

**COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA
ASFALTICA TIPO MDC-19 ADICIONADA CON FIBRAS DE TERLENKA Y UNA
MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL. VARIABLE: GRANO**



**JHOSSER BARRERA ARCINIEGAS
GONZALO CUBIDES SUAREZ
CARLOS ORLANDO RODRIGUEZ MOJICA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ D.C.
2017**

**COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA
ASFALTICA TIPO MDC-19 ADICIONADA CON FIBRAS DE TERLENKA Y UNA
MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL. VARIABLE: GRANO**

**JHOSSER BARRERA ARCINIEGAS
GONZALO CUBIDES SUAREZ
CARLOS ORLANDO RODRIGUEZ MOJICA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Especialista en Ingeniería de Pavimentos**

**Director
Ing. Esp. MSc. CARLOS JOSE SLEBI ACEVEDO
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ D.C.
2017**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Junio de 2017

Dedicatorias:

A mi esposa Diana, quien ha sido un motor y un soporte en el proceso de alcanzar mis metas y quien ha tenido la paciencia para acompañarme y aconsejarme.

A mi familia, por su inmenso apoyo.

Carlos Orlando Rodríguez Mojica

A Dios por brindarme esta oportunidad, a mi familia por su esfuerzo y apoyo incesante, a mi novia por su compañía y apoyo incondicional.

Jhosser Alexander Barrera Arciniegas

A Dios por las bendiciones del día a día y a toda mi familia por el acompañamiento y apoyo incondicional.

Gonzalo Cubides Suarez

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1 GENERALIDADES.....	16
1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2.1 Antecedentes del problema.....	16
1.2.2 Pregunta de investigación	17
1.2.3 Variables del problema.....	18
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	18
1.4 HIPOTESIS	19
1.5 OBJETIVOS	20
1.5.1 Objetivo General	20
1.5.2 Objetivos Específicos	20
2 MARCOS DE REFERENCIA.....	21
2.1 MARCO DE ANTECEDENTES.....	21
2.2 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.....	29
2.3 MARCO NORMATIVO	42
3 DEFINICIÓN DEL PLAN DE ENSAYOS	45
4 RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO	49
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	49
4.1.1 Limpieza – Gradación Combinada	49
4.1.2 Geometría de las Partículas	50
4.1.3 Dureza	52
4.1.4 Granulometría	53
4.2 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL	56
4.3 ENSAYOS DE ESTABILIDAD Y FLUJO SOBRE MEZCLAS CON ADICIÓN DE TERLENKA.....	61
4.4 ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA	67

4.5	ENSAYOS DE INMERSIÓN – COMPRESIÓN	76
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	80
5.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ESTABILIDAD Y FLUJO	80
5.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA	84
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE INMERSIÓN – COMPRESIÓN	87
6	CONCLUSIONES	91
7	BIBLIOGRAFÍA	94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1. CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS TEXTILES	34
FIGURA 3-1. DISTRIBUCIÓN DE LAS MODIFICACIONES A LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL.	46
FIGURA 3-2. PLAN DE ENSAYOS.....	47
FIGURA 4-1. VARIACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LA MEZCLA VS. CONTENIDO DE ASFALTO	58
FIGURA 4-2. VARIACIÓN DEL FLUJO DE LA MEZCLA VS. CONTENIDO DE ASFALTO	59
FIGURA 4-3. RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO VS. CONTENIDO DE ASFALTO	60
FIGURA 4-4. VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA BULK VS. CONTENIDO DE ASFALTO.....	60
FIGURA 4-5. VARIACIÓN DE LOS VACIOS DE LOS AGREGADOS MINERALES VS. CONTENIDO DE ASFALTO.....	61
FIGURA 5-1. VARIACIÓN DE LA ESTABILIDAD PARA LAS MEZCLAS ANALIZADAS.	80
FIGURA 5-2. VARIACIÓN DEL FLUJO PARA LAS MEZCLAS ANALIZADAS.	81
FIGURA 5-3. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN ESTABILIDAD / FLUJO PARA LAS MEZCLAS ANALIZADAS.	83
FIGURA 5-4. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD BULK PARA LAS MEZCLAS ANALIZADAS.	84
FIGURA 5-5. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN – PROBETAS EN CONDICIÓN SECA – REEMPLAZO EN TAMIZ 80.	85
FIGURA 5-6. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN – PROBETAS EN CONDICIÓN SATURADA – REEMPLAZO EN TAMIZ 80.	86
FIGURA 5-7. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE RESISTENCIA A TENSIÓN.....	87
FIGURA 5-8. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE – CONDICIÓN SECA.	88
FIGURA 5-9. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE – PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA.	89

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1. COMPOSICIÓN Y ORIGEN DE LAS FIBRAS SINTÉTICAS	35
TABLA 2-2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLIÉSTER	37
TABLA 2-3. PROPIEDAD DE ABSORCIÓN DE FIBRAS DE TEXTIL	38
TABLA 2-4. PROPIEDADES TÉRMICAS DE FIBRAS DE TEXTIL	39
TABLA 2-5. EFECTO DE ÁCIDOS EN FIBRAS DE TEXTIL	39
TABLA 2-6. EFECTO DE LOS ÁLCALIS EN FIBRAS DE TEXTIL	40
TABLA 2-7. EFECTO DE SOLVENTES ORGÁNICOS EN FIBRAS DE TEXTIL	41
TABLA 2-8. EFECTO DEL MOHO EN FIBRAS DE TEXTIL	41
TABLA 2-9. EFECTO DEL CALOR EN FIBRAS DE TEXTIL	42
TABLA 2-10. NORMAS DE ENSAYOS RELEVANTES PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	43
TABLA 2-11. ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN RELEVANTES PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	44
TABLA 3-1. NÚMERO DE BRIQUETAS POR ENSAYO CONTEMPLADAS EN LA INVESTIGACIÓN	48
TABLA 4-1. RESULTADOS ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA (NORMA INV E-133)	49
TABLA 4-2. RESULTADOS VALOR DE AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS (INV E-233)	50
TABLA 4-3. RESULTADOS ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS (NORMA INV E-230)	51
TABLA 4-4. RESULTADOS ENSAYO DE PARTÍCULAS FRACTURADAS – AGREGADO GRUESO (NORMA INV E-227)	51
TABLA 4-5. RESULTADOS RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37.5MM (1 ½”) POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV E-218)	53
TABLA 4-6. RESULTADOS DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL (INV E-238)	53
TABLA 4-7. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL GRAVA DE 3/4” (INV E- 238)	54

TABLA 4-8. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL GRAVA DE 1/2" (INV E-238)	54
TABLA 4-9. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL ARENA NATURAL (INV E-238).....	55
TABLA 4-10. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL ARENA DE TRITURACIÓN (INV E-238)	55
TABLA 4-11. RESULTADOS ENSAYO ESTABILIDAD Y FLUJO – CONTENIDO DE ASFALTO 4.5% (NORMA INV E-748)	56
TABLA 4-12. RESULTADOS ENSAYO ESTABILIDAD Y FLUJO – CONTENIDO DE ASFALTO 5.0% (NORMA INV E-748)	57
TABLA 4-13. RESULTADOS ENSAYO ESTABILIDAD Y FLUJO – CONTENIDO DE ASFALTO 5.5% (NORMA INV E-748)	57
TABLA 4-14. RESULTADOS ENSAYO ESTABILIDAD Y FLUJO – CONTENIDO DE ASFALTO 6.0% (NORMA INV E-748)	57
TABLA 4-15. PROMEDIO ESTABILIDAD Y FLUJO PARA DISEÑO DE MEZCLA.....	58
TABLA 4-16. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ No. 10 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	62
TABLA 4-17. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ No. 10 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 5.0%	62
TABLA 4-18. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ No. 10 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 6.0%	63
TABLA 4-19. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ No. 40 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	63
TABLA 4-20. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ No. 40 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 5.0%	64
TABLA 4-21. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ No. 40 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 6.0%	64
TABLA 4-22. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ No. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	65

TABLA 4-23. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 5.0%	65
TABLA 4-24. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 6.0%	66
TABLA 4-25. RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO – MEZCLA CONVENCIONAL (PATRÓN DE COMPARACIÓN)	66
TABLA 4-26. RESUMEN PROMEDIO DE RESULTADOS EN EL ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO PARA MEZCLAS CON INCLUSIÓN DE TERLENKA	67
TABLA 4-27. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	68
TABLA 4-28. RESULTADOS SATURACIÓN PARCIAL DE BRIQUETAS DE MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	69
TABLA 4-29. RESULTADOS SATURACIÓN FINAL DE BRIQUETAS DE MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	69
TABLA 4-30. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN – GRUPO DE BRIQUETAS EN SECO – MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	70
TABLA 4-31. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN – GRUPO DE BRIQUETAS SATURADAS – MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	70
TABLA 4-32. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 5.0%	71
TABLA 4-33. RESULTADOS SATURACIÓN PARCIAL DE BRIQUETAS DE MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 5.0%	72
TABLA 4-34. RESULTADOS SATURACIÓN FINAL DE BRIQUETAS DE MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 5.0%	72
TABLA 4-35. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN – GRUPO DE BRIQUETAS EN SECO – MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 5.0%	73
TABLA 4-36. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN – GRUPO DE BRIQUETAS SATURADAS – MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 5.0%	73

TABLA 4-37. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA CONVENCIONAL	74
TABLA 4-38. RESULTADOS SATURACIÓN PARCIAL DE BRIQUETAS DE MEZCLA CONVENCIONAL	75
TABLA 4-39. RESULTADOS SATURACIÓN FINAL DE BRIQUETAS DE MEZCLA CONVENCIONAL	75
TABLA 4-40. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN – GRUPO DE BRIQUETAS EN SECO – MEZCLA CONVENCIONAL.....	76
TABLA 4-41. RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN – GRUPO DE BRIQUETAS SATURADAS – MEZCLA CONVENCIONAL	76
TABLA 4-42. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%	77
TABLA 4-43. RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE - MEZCLA CON REEMPLAZO DE FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA TAMIZ NO. 80 – PROPORCIÓN DE REEMPLAZO = 4.0%.....	78
TABLA 4-44. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA CONVENCIONAL	78
TABLA 4-45. RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE - MEZCLA CONVENCIONAL	79

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Resultados de Ensayos de Laboratorio

Anexo 2 – Registro Fotográfico

RESUMEN

Las mezclas asfálticas modificadas con la adición de materiales que pueden mejorar su comportamiento mecánico ha sido un campo de estudio que ha tenido un crecimiento importante durante los últimos años. En línea con dicha tendencia, y continuando con investigaciones anteriores, se realiza el presente trabajo que trata de la comparación del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional contra una serie de mezclas asfálticas modificadas mediante el reemplazo por Terlenka de una fracción de agregados de un tamaño específico.

La Terlenka es un material compuesto por poliéster y que es utilizado en labores textiles para la fabricación de elementos de alta resistencia. Adicionalmente, la Terlenka se consideró como un material importante de evaluar ya que al someterse a temperaturas elevadas, como las de mezcla del concreto asfáltico, sufre un proceso de ablandamiento que puede llevar a la interconexión de las fibras en la mezcla y posteriormente, durante la etapa de enfriamiento, se convierte en un material rígido que puede aportar resistencia a la mezcla.

Por lo tanto, se realizó la evaluación de las mezclas asfálticas con adición de Terlenka reemplazando fracciones granulométricas en los tamaños de agregados correspondientes al tamiz No.10, No.40 y No.80, en proporciones de reemplazo del 4.0%, 5.0% y 6.0%.

La evaluación del comportamiento mecánico se realizó a través del ensayo de estabilidad y flujo, al igual que se evaluó la resistencia a la tracción y a la compresión simple, junto con los efectos del agua sobre las mezclas.

Palabras Claves: Mezcla asfáltica modificada, Terlenka, Estabilidad, Flujo, Resistencia a Tensión, Resistencia a compresión, Efectos del agua.

ABSTRACT

The hot asphalt mixes modified with the addition of materials which could improve its mechanical behavior has been a field of study that has have an important grow during the last years. In line with this tendency and continuing with previous investigations was carried out the present work which deals with the comparison of the mechanical behavior of a conventional asphalt mix against various asphalt mixes modified using Terlenka as a replacement of a fraction of aggregates with an specific size.

Terlenka is a material composed by polyester and it is used in textile activities to produce elements with high resistance. Additionally, Terlenka is considered as an important material to be assessed due to its behavior when it is exposed to high temperatures, as those used in the process of mixing asphalt concretes, because there is a process of softening that could produce interconnection between the fibers in the mixture and consequently, during the cooling stage, the Terlenka become a rigid material that could improve the resistance of the asphalt mix.

Therefore, it was carried out the assessment of the hot asphalt mixes with the addition of Terlenka replacing specific granulometric fractions in the sizes corresponding to the sieves No. 10, No. 40 and No. 80, in proportions of replacement of 4.0%, 5.0% and 6.0%.

The assessment of the mechanical behavior was carried out through the stability and flow test, as well as the tensile strength and the simple compression strength, along with the effects of the water on the hot asphalt mixes.

Key Words: Modified hot asphalt mixes, Terlenka, Stability, Flow, Tensile Strength, Compression Strength, Water effects.

INTRODUCCIÓN

La construcción de carreteras en Colombia es una actividad que se ha venido desarrollando con mayor impulso en los últimos años con el objetivo de mejorar la conectividad y los medios de transporte de bienes y servicios, lo cual se ve directamente reflejado en la competitividad del país. Esto se traduce en políticas de inversión para la construcción de nuevas vías y el mejoramiento y mantenimiento de las carreteras existentes, ya sea con la intervención directa del estado o a través de concesiones (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016).

En línea con el desarrollo de las obras de las carreteras, se debe buscar el desarrollo de materiales alternativos que permitan obtener beneficios en términos de costos, vida útil o impactos ambientales. Específicamente en el área de los pavimentos y de las mezclas asfálticas, en los años recientes se han incorporado materiales nuevos como los asfaltos modificados con polímeros o con otros materiales como el grano de caucho, cuya aplicación se encuentra ya estandarizada (Ver artículos INV 413, INV 414 e INV 415 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS), los cuales tienen por objeto mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas, aumentar la vida útil o generar impactos ambientales positivos.

Por lo tanto, resulta valioso explorar materiales alternativos que puedan generar ese tipo de resultados y para el caso, siguiendo líneas de investigación definidas en el ámbito académico, se toma el material denominado Terlenka para evaluar si puede ser utilizado dentro de las mezclas asfálticas obteniendo comportamientos favorables.

1 GENERALIDADES

1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Línea de Investigación: Pavimentos – Mezclas asfálticas modificadas.

El presente trabajo de grado se enmarca dentro de la línea de investigación de las mezclas asfálticas modificadas, la cual se encuentra aprobada por la Universidad Católica de Colombia, y que tiene como fin la evaluación del comportamiento mecánico de mezclas que incorporan un material específico elegido dentro de amplio rango de opciones, y que considerando una hipótesis definida podría conducir a la mejora en la respuesta mecánica de las mezclas o conllevar impactos ambientales positivos a partir del reemplazo de una porción de los agregados utilizados en las mezclas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Antecedentes del problema

Durante la evaluación del desempeño de mezclas de concreto asfáltico en Colombia se han identificado algunas problemáticas que conducen a la intervención temprana de estos materiales. Las problemáticas se relacionan con la aparición de diversas patologías como el envejecimiento prematuro, el agrietamiento, la pérdida de agregados y el ahuellamiento (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2008).

El impacto de la aparición temprana de estas patologías sobre la infraestructura y los costos de mantenimiento asociados, generan un especial interés por el estudio de las causas, que se asocian principalmente con la calidad de los agregados, la calidad del asfalto, los procesos de producción y construcción, y en menor medida, con la calidad de los diseños estructurales (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2008).

Dentro de este abanico de posibilidades, la calidad de los agregados y del asfalto, así como la calidad de las mezclas obtenidas a partir de estos, cobran importancia y se hace necesario identificar con mayor precisión su influencia en el desempeño de las capas flexibles, al igual que conllevan a la búsqueda de alternativas para

mejorar el comportamiento durante la vida útil de las estructuras de pavimento que involucran este tipo de materiales.

La problemática de la calidad de las mezclas se ve reflejada, en conjunto con otros muchos factores, en el estado de las carreteras a nivel nacional, de tal forma que a partir de los indicadores del Instituto Nacional de Vías, se establece que aproximadamente el 43% de la vías a cargo del Instituto presentan un estado malo (14%) o regular (29%) (INVIAS, 2015).

En respuesta a esa condición de las vías, el gobierno nacional planea inversiones de alrededor de 4 billones de pesos para el periodo 2015 a 2019, incluyendo el mantenimiento y mejoramiento de la red vial pavimentada no concesionada (primaria y secundaria) (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016), razón por la que buscar materiales con un mejor comportamiento mecánico puede generar alternativas viables para la optimización de las inversiones y la atención más amplia de las necesidades del país en materia de carreteras.

Otro aspecto a tener en cuenta es que de acuerdo con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013), tanto los agregados gruesos como los agregados finos que hacen parte de una mezcla asfáltica, debe provenir de la trituración y clasificación de roca, es decir, de la explotación de fuentes de materiales (canteras).

Sin embargo, esta práctica se ve cada día más limitada teniendo en cuenta que la disponibilidad de fuentes de materiales se reduce con el paso del tiempo y se presentan impactos ambientales importantes asociados con su explotación. Por esta razón, en los años recientes, las prácticas constructivas han estado buscando la inclusión de materiales alternativos en las mezclas asfálticas que permitan obtener comportamientos mecánicos similares al de las mezclas convencionales con un menor consumo de agregados.

1.2.2 Pregunta de investigación

¿Cuál es el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica tipo MDC-19, adicionada con fibras de terlenka en forma de grano comparada con el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional?

1.2.3 Variables del problema

Para establecer una base de comparación y evaluar la variación en el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica tipo MDC-19 con adición de Terlenka en forma de grano con respecto a una mezcla convencional, se han establecido las siguientes variables de estudio:

Variables Independientes o Principales

Las variables independientes o principales para el estudio corresponden a:

- Tipo de mezcla asfáltica: MDC-19 de acuerdo con las exigencias establecidas en el artículo 450 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (INVIAS, 2013).
- Tipo de material de inclusión: Terlenka.
- Forma del material de inclusión: Grano.
- Origen de los agregados: Una sola fuente de agregados. Para el desarrollo de la investigación, se utilizaron agregados provenientes de CONCRESCOL.

Variables Dependientes

Las variables dependientes o complementarias consideradas en el estudio corresponden a:

- Respuesta mecánica de la mezcla, en términos de estabilidad y flujo.
- Susceptibilidad al agua, evaluada a través de los ensayos de tracción indirecta e inmersión-compresión.
- Porcentaje de material de inclusión.
- Fracción granulométrica a ser reemplazada.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Como parte de las propuestas gubernamentales para mejorar las condiciones de producción y aumentar la competitividad del país, de acuerdo con lo indicado por el Ministerio de Transporte de Colombia (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016), se planean y se desarrollan diferentes tipos de inversiones en el campo de la infraestructura vial.

Dichas inversiones se proyectan a través de concesiones que cubren 7000km aproximadamente o sobre las vías a cargo del Instituto Nacional de Vías – INVIAS que cubre otros 6000km, lo cual quiere decir que se avecina en el futuro cercano un volumen muy importante de obras para el mantenimiento, mejoramiento y construcción de carreteras (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016).

Teniendo en cuenta esas proyecciones, se considera importante evaluar materiales alternativos en la producción de mezclas asfálticas, que puedan proporcionar desempeños durante su vida útil, similares o mejores a las mezclas convencionales, y que adicionalmente ofrezcan ventajas de carácter ambiental, como una reducción en los volúmenes de agregados requeridos.

No se debe olvidar que en la actualidad gran parte de los avances e innovaciones están dirigidos a la búsqueda de nuevos materiales y tecnologías amigables con el medio ambiente, que eviten los problemas tan recurrentes en los pavimentos asfálticos ante las condiciones climáticas y el aumento del flujo vehicular, como lo son la fisuración, el ahuellamiento y el envejecimiento prematuro, entre otros, los cuales generan una pérdida del nivel de servicio de las carreteras y la necesidad de ejecutar obras de mantenimiento antes de lo proyectado (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2008).

La realización de esta investigación tiene como finalidad identificar, a través de la ejecución de ensayos de laboratorio de acuerdo a las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS , 2013), el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica adicionando fibras de terlenka.

Se parte de investigaciones anteriores, en las que se han obtenido resultados variables en términos de resistencia y flujo de mezclas asfálticas con adición de terlenka comparadas con las convencionales. Igualmente se enmarca dentro de la línea de investigación de mezclas modificadas, aprobada por la Universidad Católica.

1.4 HIPOTESIS

La hipótesis de la investigación consiste en que la mezcla asfáltica con la incorporación del material de terlenka reemplazando una fracción granulométrica, puede tener un comportamiento similar o mejor en términos mecánicos con respecto a una mezcla convencional, teniendo en cuenta que dadas las temperaturas requeridas en el proceso de producción de la mezcla, la terlenka

puede generar un efecto de refuerzo por la eventual interconexión que se logra entre las fibras dentro de la mezcla.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Comparar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica tipo MDC-19, adicionada con fibras de Terlenka en forma de grano a diferentes dosificaciones, y de una mezcla asfáltica convencional.

1.5.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del estudio propuesto corresponden a:

- Caracterizar los materiales que serán los componentes de las mezclas asfálticas a ser estudiadas, incluyendo la caracterización del material que será utilizado como adición para la mezcla asfáltica: Terlenka en forma de grano.
- Construir un plan de dosificación y distribución del material de adición: Terlenka en forma de grano, dentro de la mezcla asfáltica y construir un plan de ensayos.
- Elaborar una muestra de estudio (probetas) de acuerdo con la normatividad vigente y siguiendo el plan de ensayos establecido, someterla a las pruebas correspondientes (estabilidad - flujo, inmersión - comprensión y tracción indirecta).
- Analizar los resultados obtenidos y determinar la variación del comportamiento de las mezclas con la adición de Terlenka.

2 MARCOS DE REFERENCIA

2.1 MARCO DE ANTECEDENTES

En vías pavimentadas con adición de residuos plásticos se pueden nombrar varias construidas en Ámsterdam, Holanda, en 1936, las cuales soportaron todo el tráfico pesado de la invasión a Alemania y su posterior retirada, la cual demostró un buen desempeño hasta el punto de crear recomendaciones para su construcción posterior en Europa y Estados Unidos.

Durante el decimoctavo congreso mundial de vías, realizado en Sydney, Australia, en octubre de 1983, fue presentada la utilización de látex en cada país, debido principalmente al precio del petróleo (J. E. Orjuela, 2014).

Australia, Bélgica, Francia, Gran Bretaña, Portugal, Estados Unidos, España y Alemania han desarrollado procesos de modificación de los ligantes asfálticos con la incorporación de polímeros de manera tal que han mejorado las propiedades y obtenido resultados más económicos.

En Francia el empleo ha sido cada vez mayor, a partir de la “Jornada de Estudios de Asfalto Caucho” realizada en LCPC en 1964, siendo adoptadas las normas técnicas, después de quince años de estudios sobre modificaciones más favorables obtenidas a través de compuestos macromoleculares para el refuerzo de carreteras.

En España se usa látex en las capas asfálticas, especialmente para mejorar las características de ligante entre los agregados y con ello aumentar la resistencia mecánica, la susceptibilidad térmica y las condiciones reológicas generales. Varios estudios fueron realizados en el año de 1985 en España por el ingeniero Miguel Ángel Del Val, donde se sustituía porcentaje de betún por desperdicio plástico doméstico y era probado en el ensayo de pista del laboratorio, con una rueda maciza de 10 centímetros de radio y 5 centímetros de ancho que aplica una carga fija sobre una probeta prismática de 30 centímetros de ancho por 30 centímetros de largo y 5 centímetros de alto y contenida en un molde de acero. Los resultados obtenidos fueron que la susceptibilidad a las deformaciones permanentes de la mezcla bituminosa en las que el betún se ha sustituido parcialmente por desperdicio plástico es reducida y tanto más cuanto mayor sea el contenido de desperdicio plástico (J. E. Orjuela, 2014).

En Brasil las primeras experiencias fueron realizadas por el ingeniero Jean Claude Vogt, en Bahía, en 1968, con concreto asfáltico al introducirle látex SBR en forma manual a un mezclador. En 1969 el mismo ingeniero, con la colaboración de Farah, creó un tramo experimental entre dos poblaciones e introdujo el látex como parte del betún.

En Colombia, en 1998, los ingenieros Fredy Alberto Lizcano y Óscar Javier Reyes Ortiz, presentaron un estudio experimental sobre el porcentaje de desperdicio plástico con respecto al peso de la briqueta del ensayo Marshall que se debe a agregar para obtener el óptimo de mejoramiento en las propiedades mecánicas de una capa de asfalto teniendo como base los resultados de estabilidad, flujo, peso unitario y módulo de los ensayos Marshall (Rondon, Estado del conocimiento sobre el estudio de mezclas asfálticas modificadas en Colombia. , 2008).

Como antecedente más cercano al presente trabajo se encuentra la investigación de la Escuela de Ingenieros Militares, donde participaron los ingenieros Zulma Ahumada Basto, John Freddy Abril Ardila, Laurent Andrés Corredor Monroy, entre otros, los cuales fueron asesorados por el ingeniero Daniel Zuluaga. Dicha investigación se centró en la elaboración de una mezcla asfáltica más un porcentaje de adición de Terlenka en forma de granos, de 10%, 30% y 50%. La finalidad de la investigación consistió en buscar una alternativa de solución a las problemáticas de envejecimiento, deformación, y susceptibilidad a los agentes externos climáticos, especialmente en zonas donde los cambios de temperatura son considerables, y a la acción de las cargas del tránsito (Z. Basto, 2016).

A continuación, se presenta un resumen de diferentes fuentes que tratan de las mezclas asfálticas con adiciones de materiales sintéticos, pero especialmente con fibras de poliéster, que es el mismo material que compone la terlenka, a nivel mundial:

Título: "Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers" (Shaopeng Wu, 2008)

Resumen: El documento presenta los resultados de una investigación realizada en la Universidad de Wuhan (China) sobre los efectos de fibras de poliéster en las características reológicas y de fatiga de mezclas asfálticas. A partir de diferentes contenidos de fibras de poliéster se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar el ligante asfáltico y la mezcla asfáltica, de tal forma que se logró

determinar que la viscosidad del ligante asfáltico tuvo un incremento con el aumento en el contenido de fibras, especialmente a bajas temperaturas.

Así mismo, los resultados de los ensayos de módulo dinámico para mezclas con el 0.3% de fibras indicaron que el módulo dinámico y el ángulo de fase disminuyeron para una misma temperatura, lo cual lleva a la disminución de los parámetros de fatiga de la mezcla. De esta forma, al hacer la comparación con la mezcla de asfáltica de control, el número de ciclos de fatiga de la mezcla modificada resulto ser mayor entre 1.9 y 3.6 veces. El documento concluye indicando que las propiedades de fatiga de la mezcla pueden ser mejoradas efectivamente con la adición de fibras de poliéster, especialmente ante bajos niveles de esfuerzos.

Título: "Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures" (Huaxin Chen, 2009)

Resumen: El documento presenta la investigación realizada sobre las propiedades volumétricas y mecánicas de mezclas asfálticas reforzadas con fibras, utilizando para ello cuatro tipos diferentes de fibras: poliéster, poliacrilonitrilo, lignina y fibras de asbestos. Las mezclas realizadas se sometieron a ensayos Marshall y de desempeño para evaluar además, la susceptibilidad a la humedad y la estabilidad dinámica.

Los resultados mostraron que inicialmente el contenido óptimo de asfalto, los vacíos con aire, los vacíos en los agregados y la estabilidad (Marshall) se incrementan, mientras que el peso específico disminuye a medida que se adicionan fibras a la mezcla, hasta el punto en el que cambian su comportamiento y disminuyen con el aumento de la dosis de fibras adicionadas.

En general, se identificó que las mezclas con fibras de poliéster y de poliacrilonitrilo presentan una mayor estabilidad teniendo en cuenta el efecto de red, en tanto que las mezclas con lignina y con fibras de asbestos presentaron un mayor contenido óptimo de asfalto debido a su mayor absorción de asfalto.

Finalmente, el documento propone una metodología para el diseño de mezclas en el cual se selecciona el tipo de fibra con base en las características de la mezcla y de las fibras, determinando el contenido óptimo de asfalto siguiendo el método Marshall y determinando el contenido óptimo de fibras con base en los resultados de ensayos de desempeño. Para dicha investigación, un contenido óptimo de fibras de poliéster fue de 0.35% en peso de la mezcla.

Título: “Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review” (Sayyed Mahdi Abtahi, 2010)

Resumen: Esta es una revisión de documentos relacionados con mezclas asfálticas que incluyen adiciones de fibras, denominadas como mezclas asfálticas reforzadas con fibras (fiber-reinforced asphalt concrete – FRAC). El tema es dividido en dos perspectivas: la inclusión de fibras aleatoriamente en las mezclas y el uso de materiales geosintéticos, concentrándose en el análisis de la primera.

De esta forma se expone el efecto de diferentes tipos de fibras: fibras de polipropileno, fibras de poliéster, fibras de asbestos, fibras de celulosa, fibras de carbón, fibras de vidrio y fibras de nylon, sobre tres diferentes aspectos: mejora mecánica, conductividad eléctrica de las mezclas y la creación de un nuevo mercado de manejo de fibras.

El documento concluye indicando que la inclusión aleatoria de fibras, en general, tiene efectos positivos que se traducen en la mejora de los módulos dinámicos, la susceptibilidad a la humedad, la resistencia al ahuellamiento y a la resistencia a efectos de congelamiento-deshielo, al igual que reducen el reflejo de fisuras en las mezclas.

Título: “Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects” (Qinwu Xu, 2010)

Resumen: El documento presenta el estudio realizado acerca de los efectos y mecanismos de refuerzo de las fibras sobre mezclas asfálticas bajo temperatura ambiental y los efectos del agua, analizando cuatro tipos de fibras: poliéster, poliacrilonitrilo, lignina y fibras de asbestos.

Se realizaron ensayos de laboratorio sobre las mezclas asfálticas reforzadas con fibras (FRAC) con el fin de medir la resistencia, la deformación y la fatiga, de tal forma que los resultados mostraron una mejora importante en las mezclas en términos de resistencia al ahuellamiento, resistencia a la fatiga y en la tenacidad. Así mismo, la resistencia y la deformación a la flexión y la resistencia a la tracción indirecta mostraron mejores comportamientos con la adición de fibras.

Se destaca en la investigación que las mezclas con adiciones de fibras de polímeros: poliéster y poliacrilonitrilo, presentaron mejores comportamientos en

términos de ahuellamiento y resistencia a la fatiga y a la tracción indirecta, asociado principalmente a un mejor comportamiento como red. No obstante, las mezclas con adiciones de lignina y fibras de asbestos, presentaron mejores resultados en resistencia y deformación por flexión asociado con un mayor efecto de estabilización de las mezclas.

En cuanto al comportamiento de las mezclas ante efectos de congelamiento y deshielo, no se evidenció un comportamiento positivo.

La investigación concluye que las mezclas con fibras de poliéster, con un contenido de fibras de 0.35% en peso de la mezcla, mostraron el mejor comportamiento para la resistencia al ahuellamiento y la resistencia a la tracción indirecta.

Título: "Laboratory investigation of indirect tensile strength using roofing polyester waste fibers in hot mix asphalt" (Kalia Anurag, 2009).

Resumen: La investigación se concentra en el uso de fibras de poliéster provenientes de desecho de techumbres, teniendo en cuenta que resulta ser un material económico, se da un uso ambientalmente amigable y se considera que tiene un impacto positivo en el incremento de las propiedades de mezclas asfálticas.

El principal objetivo de la investigación consistió en determinar si las fibras de poliéster provenientes de los desechos, homogéneamente dispersas, mejoraban la resistencia a la tracción indirecta y a la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas.

En general, los resultados indicaron que se tiene una mejora en la resistencia a la tensión húmeda de las mezclas, incrementando el valor de la tenacidad tanto en condición seca como húmeda. También se estableció un incremento en el contenido de vacíos, el contenido de asfalto y la estabilidad Marshall.

Título: "Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers" (J. S. Chen, 2005)

Resumen: La investigación se enfocó principalmente en la adición de fibras: orgánicas, minerales y poliéster, como refuerzo en mezclas asfálticas. Para evaluar las propiedades y el comportamiento de las mezclas modificadas fueron

realizados ensayos de viscosidad, resistencia y tenacidad, ensayos reológicos y microscopía.

El resultado de estos ensayos muestra que el efecto del refuerzo aumenta con el incremento de fibras hasta alcanzar una fracción crítica, también se identificó que con mayores temperaturas de mezcla se obtiene una mayor relación de viscosidad entre el material adicionado y el asfalto. La resistencia del asfalto modificado aumenta con el incremento del contenido de fibra, ya que las fibras absorben parte de las cargas de tensión, esto implica que también se desarrolla una buena adhesión entre el asfalto y las fibras, lo cual pudo comprobarse con el microscopio electrónico de barrido el cual mostró que las fibras refuerzan el asfalto con una estructura tridimensional.

Así mismo esta investigación estableció que existe una fracción crítica de fibras a adicionar, ya que en el momento en que se empieza a desarrollar una interacción entre fibras se obtiene una reducción en la resistencia. De tal manera que el contenido de fibra óptimo dependerá del tipo de fibra, la longitud y el diámetro.

La adición de fibras endurece el asfalto y posee beneficios potenciales para reducir la cantidad de material drenante. Un efecto de endurecimiento, diez (10) veces, mayor al obtenido en un asfalto no modificado, parece ser adecuado para una mezcla modificada con fibras; sin embargo, esto debe evaluarse desde el punto de vista de desempeño y costo, lo cual impactara en la selección del tipo de fibra a emplear.

Las fibras de poliéster pueden ser usadas, si la mezcla modificada va a ser usada a altas temperaturas.

Título: "Reinforcement of Asphalt Concrete by Polyester Fibers to Improve Flexural Bending Fatigue Resistance" (M.Q. Ismael, 2015)

Resumen: El asfalto reforzado con fibras de poliéster se considera una medida de remediación para aliviar el impacto nocivo del deterioro por fatiga, ésta fue la premisa de la investigación con la cual se desarrollaron especímenes de prueba con contenidos de poliéster que tenían las siguientes variaciones en su composición: dos tamaños de fibra (6.35mm x 3.00mm y 12.70mm x 3.00mm) y tres concentraciones (0.25%, 0.50% y 0.75%) por peso de mezcla.

Los especímenes de prueba mencionados anteriormente, fueron sometidos a tres ensayos tradicionales para agregados y mezclas asfálticas: Prueba Marshall, ensayo de resistencia a tracción indirecta y ensayo de flexión.

El asfalto modificado con las diferentes cantidades de fibra de poliéster, mostró un comportamiento satisfactorio ante la fatiga, en el ensayo de flexión. Se observó que para obtener propiedades Marshall óptimas, el contenido de asfalto requerido aumenta a medida que el tamaño y contenido de fibras de poliéster aumenta.

Las muestras de asfalto modificado con fibras tienen una mayor relación de vacíos que las muestras de control que no tienen ningún tipo de fibra. En las muestras de asfalto modificadas con fibra, la resistencia a la tensión se reduce.

La estimación de la fatiga a partir de las cargas cíclicas en el ensayo de flexión, soporta la idea que las fibras de poliéster realmente mejoran la resistencia a la fatiga.

Título: “Effect of fiber types on relevant properties of porous asphalt” (W. Shao-peng, 2006)

Resumen: Esta investigación buscó evaluar los efectos del uso de fibra de celulosa y poliéster en mezclas de asfalto porosas. Para ello se realizaron ensayos de drenaje, abrasión, propiedades volumétricas, reológicas y daño por humedad, adicionalmente se tomaron imágenes con el microscopio electrónico de barrido y tomografías computarizadas de rayos X para identificar la microestructura de la fibra y del esqueleto de los agregados del asfalto poroso.

Basados en la teoría de Mohr-Coulomb, la cohesión y el ángulo de fricción interna de las mezclas se realizaron ensayos de resistencia: tensión indirecta y compresión confinada.

Los resultados de las pruebas indican que las fibras principalmente estabilizan el ligante asfáltico y aumentan el espesor de la película alrededor de los agregados. Además, dan como resultado un ligero aumento en la resistencia mecánica de las mezclas asfálticas porosas a altas temperaturas.

El uso de fibras reduce la capacidad de drenaje de la mezcla asfáltica, teniendo mejor capacidad de drenaje las mezclas asfálticas modificadas con poliéster. El

uso de fibras genera un ligero aumento de resistencia. Comparativamente, las fibras de celulosa dan un mejor rendimiento que las fibras de poliéster en mezclas asfálticas porosas.

Título: “Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures” (Q. Ye, 2009)

Resumen: Las propiedades de fatiga y respuesta dinámica de mezclas de asfalto modificadas con fibra fueron abordadas en esta investigación, para lo cual se emplearon tres tipos de fibra: celulosa, poliéster y fibra mineral. El ensayo de modulo dinámico usando Superpave fue ejecutado para determinar el módulo dinámico y el ángulo de fase de las mezclas de asfalto a varias temperaturas y frecuencias. Las propiedades de fatiga de las mezclas asfálticas fueron estudiadas por el ensayo de tensión indirecta a diferentes niveles de esfuerzo. Los resultados de los ensayos mostraron que las mezclas asfálticas modificadas con fibras tienden a tener módulos dinámicos y ángulos de fase bajos. Esto indica que la rigidez de las mezclas asfálticas modificadas con fibras puede ser reducida y la flexibilidad de las mezclas puede ser mejorada, lo que también genera un cambio en las propiedades visco elásticas de la mezcla asfáltica.

El parámetro de fatiga derivado de las mediciones de respuesta dinámica fue utilizado para estimar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, los resultados indicaron que las mezclas asfálticas modificadas con fibras tienen una mejor resistencia a la fatiga comparado con las muestras de control.

Título: “Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia” (Rondon, 2008)

Resumen: La modificación de asfaltos para mejorar las características de resistencia y deformación, que presentan las mezclas asfálticas, es una técnica ampliamente utilizada en el mundo y en Colombia ha sido objeto de desarrollos investigativos importantes por diversas instituciones de educación superior.

El trabajo muestra el análisis de la información de 40 proyectos de investigación desarrollados por diversas instituciones de educación superior, en donde se analizaron principalmente: objetivos, problema de investigación, tipos de aditivos, metodología ensayos realizados, resultados, recomendaciones y conclusiones.

En referencia a las investigaciones realizadas con la adición de Fibras de Poliéster, el documento señala que se produce aumento en la densidad y una

disminución de la estabilidad en las mezclas debido a que la fibra no presenta resistencia significativa a cargas de compresión, sin embargo, se identifica un aumento en la resistencia última en el ensayo de tracción indirecta y en la adherencia.

Con base en el análisis de información realizado en el artículo, se observa un importante desarrollo académico e investigativo, sin embargo, la aplicación práctica de los asfaltos modificados es muy baja.

El desarrollo investigativo del comportamiento dinámico de mezclas asfálticas modificadas es pobre, ya que pocas instituciones cuentan con los equipos necesarios para medir este tipo de propiedades. El uso de aditivos provenientes de materiales de desecho o reciclaje, tienen como connotación adicional su reducción en el impacto negativo que este tipo de materiales producen en el medio ambiente.

2.2 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

En primera instancia se explican los ensayos que permiten definir el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica, así como la susceptibilidad ante la acción del agua, y posteriormente se trata de las fibras sintéticas y en particular de la Terlenka, explicando sus propiedades.

Ensayo Estabilidad – Flujo con el Equipo Marshall: En el medio Colombiano, el ensayo debe seguir los lineamientos de la Norma INV E-748 de acuerdo con el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras (INVIAS, 2013) en la cual se establece que es aplicable para mezclas con agregados menores a 25.4mm (1") y a partir de la cual se deben elaborar probetas que deben tener un diámetro de 102mm (4") y una altura 63.5mm (2 ½").

La preparación de las probetas se debe realizar partiendo de la separación de los agregados en cinco (5) franjas de tamices: de 1" a 3/4", de 3/4" a 3/8", de 3/8" a Tamiz No. 4, de Tamiz No. 4 a Tamiz No.8 y el restante bajo el Tamiz No.8. Posteriormente se deben calentar los agregados a una temperatura mayor a la establecida para el proceso de mezcla, sin superarla en más de 28°C.

Por su parte, el cemento asfáltico se calienta a la temperatura requerida para lograr una viscosidad de 170 cp y con los agregados calientes se procede a

realizar la mezcla. Una vez preparada la mezcla, se lleva al horno por un tiempo entre 1 y 2 horas, hasta llegar a la temperatura de compactación, la cual corresponde a la requerida para lograr una viscosidad de 280cp para el cemento asfáltico.

Después de la compactación de la mezcla, ésta se deja enfriar a una temperatura en la que se pueda realizar la extracción del molde sin que se produzcan afectaciones de las probetas. Una vez los especímenes se han extraído de los moldes, se dejan reposar por una noche.

Antes del ensayo en el equipo Marshall, con el cual se establecen los valores de estabilidad y flujo, las muestras deben ser curadas en un baño de agua por un tiempo de 30 a 40 minutos o en un horno por un tiempo de 120 a 130 minutos. La temperatura del baño de agua o del horno debe ser de 60°C.

Cuando el ensayo se realiza para establecer el contenido óptimo de asfalto para una mezcla, se deben fabricar mínimo 3 probetas por cada contenido de asfalto a ser evaluado. El contenido de asfalto se evaluará en un rango preestablecido de acuerdo con la experiencia de mezclas similares, con variaciones de 0.5% de contenido de asfalto en peso.

La medición de la estabilidad y el flujo se debe realizar con el equipo Marshall, aplicando la carga con una tasa de deformación controlada de 50mm/min hasta la falla, midiendo la estabilidad con un anillo dinamométrico con precisión de 50N. El flujo se debe medir con un deformímetro de lectura final fija o con un transductor lineal diferencial variable (TLDV), siempre que la precisión en las mediciones sea mínimo de 0.25mm.

Evaluación de la susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas utilizando el ensayo de tracción indirecta: Este ensayo consiste en someter una mezcla asfáltica a un proceso de saturación para evaluar el efecto que tiene el agua en la resistencia de la mezcla, evaluada a través del ensayo de tracción indirecta. Para el medio Colombiano, el ensayo debe seguir los lineamientos indicados dentro de la norma INV E-725 (INVIAS , 2013).

Para el ensayo se requiere la fabricación de 6 probetas por cada tipo de mezcla a ser evaluada, las cuales serán divididas en dos grupos: un grupo de tres probetas

que se someterá a saturación y otro grupo de tres probetas que se mantendrá en condiciones secas.

Las probetas deben tener dimensiones similares a las del ensayo de Estabilidad y Flujo con el equipo Marshall descrito anteriormente, es decir, una altura de 102mm y un diámetro de 63.5mm para mezclas con tamaño de agregado menor a una 25.4mm. Si el tamaño del agregado es mayor a 25.4mm, el diámetro de las probetas debe ser de 150mm.

Las probetas se deben fabricar siguiendo el procedimiento descrito para el ensayo de Estabilidad y Flujo en cuanto a la dosificación, mezcla y compactación, teniendo en cuenta que el porcentaje de vacíos con aire de la mezcla debe estar entre 6% y 8%, Adicionalmente, se debe tener en cuenta que luego de la compactación de las probetas, éstas se deben dejar enfriar a temperatura ambiente y se deben ensayar dentro de las 24 horas posteriores a su fabricación.

El proceso de saturación del grupo de probetas que se someten a la acción del agua inicia con una etapa de saturación parcial con agua destilada aplicando una presión de vacío de 70kPa sobre las muestras. El resultado de esta etapa debe ser una saturación de la probeta entre el 55% y el 80%. Si la saturación es menor al rango indicado, se debe repetir el proceso aplicando una mayor presión de vacío; en el caso de que la saturación sea superior al 80%, la probeta debe ser descartada.

La saturación se establece a partir de la relación entre el volumen de vacíos con agua en la mezcla, después de la saturación, y el volumen de vacíos con aire en la mezcla en condición seca, antes de la saturación:

$$\text{Saturación (\%)} = \frac{V_{wa}}{V_A}$$

El volumen de vacíos con aire se determina de acuerdo con la norma INV E-736, en tanto que el volumen de agua se establece a partir de la diferencia de masa de la probeta en condición saturada y la condición seca.

Posterior a la etapa de saturación parcial, las probetas se sumergen en un baño con agua destilada a una temperatura de 60°C durante 24 horas para aumentar el grado de saturación, el cual es aceptable si es mayor al 80%. En cada etapa de

saturación se debe establecer el cambio en las dimensiones de cada una de las probetas, con el fin de establecer la expansión.

Finalmente, antes de someter las muestras saturadas a carga, éstas se deben acondicionar llevándolas un baño de agua a 25°C por una hora.

El ensayo continúa sometiendo cada una de las probetas de los dos grupos definidos, a una carga de compresión diametral, que se debe aplicar controlando la tasa de deformación, la cual debe ser de 50mm/min. La aplicación de carga se realiza con franjas que deben tener un ancho de 12.7mm para las muestras de 63.5mm de diámetro o 19.05mm para las probetas de 150mm.

Una vez se ha aplicado la carga hasta la falla, se calcula la resistencia a la tensión de cada una de las probetas utilizando la siguiente expresión:

$$R_T = \frac{2000 P}{\pi D t}$$

Donde: R_T = Resistencia a la Tensión (kPa)
 P = Carga de falla (N)
 t = Altura (o largo) de la probeta
 D = Diámetro de la probeta

Posteriormente se establece el promedio de resistencia de cada uno de los grupos de probetas, de tal forma que se determina el valor de resistencia promedio a la tensión en condición seca y en condición saturada, a partir de los cuales se define la relación de resistencias a tensión:

$$RRT(\%) = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} * 100$$

Donde: RRT = Relación de Resistencia a la Tensión (%)
 R_{TH} = Resistencia a la tensión – probetas saturadas (kPa)
 R_{TS} = Resistencia a la tensión – probetas secas (kPa)

Ensayo de Inmersión – Compresión: Este ensayo tiene el objetivo de establecer el grado de afectación que presenta una mezcla asfáltica compactada que se somete a la acción del agua. Para ello, se establece la resistencia a la compresión simple de probetas conservadas en estado seco y de probetas sometidas a la acción del agua para luego obtener el valor de resistencia conservada. En el medio Colombiano, la norma INV E-738 contiene los lineamientos para la ejecución del ensayo.

Para cada mezcla a ser evaluada, se debe preparar un conjunto de 6 probetas con una altura de 101.6mm (4") y un diámetro de 101.6mm (4") y se divide en dos grupos de 3 probetas cada uno.

El primer grupo de probetas, que corresponde a la mezcla que se conserva en condiciones secas, se debe acondicionar durante no menos de 4 horas en un baño de aire a 25°C antes de evaluar la resistencia a la compresión simple.

El segundo grupo de probetas corresponde al que se somete a la acción del agua, de tal forma que los especímenes se sumergen en un baño de agua con una temperatura de 60°C por 24 horas, después de lo cual se acondicionan en un baño de agua a 25°C por 2 horas antes de ser llevados a la prensa para evaluar la resistencia a la compresión simple.

El valor de la resistencia conservada se calcula como

$$\text{Resistencia Conservada (\%)} = \frac{R_1}{R_2} * 100$$

Donde: R_1 = Resistencia Promedio Grupo 1 – Condición Seca (kPa)
 R_2 = Resistencia Promedio Grupo 2 – Condición Húmeda (kPa)

Fibra sintética: Es una fibra textil que proviene de la síntesis de distintos productos derivados del petróleo. Por otro lado, están las fibras artificiales, las cuales proceden de materiales naturales, básicamente celulosa. Las fibras sintéticas son por completo químicas, pues la obtención de la materia prima y de cada una de sus hebras son producto o hechas por el ser humano. Las más comunes son:

- Poliéster (existen derivados retardantes de flama como el Avora y Trevira)
- Acrílico
- Polipropileno (olefínica)

- Nylon

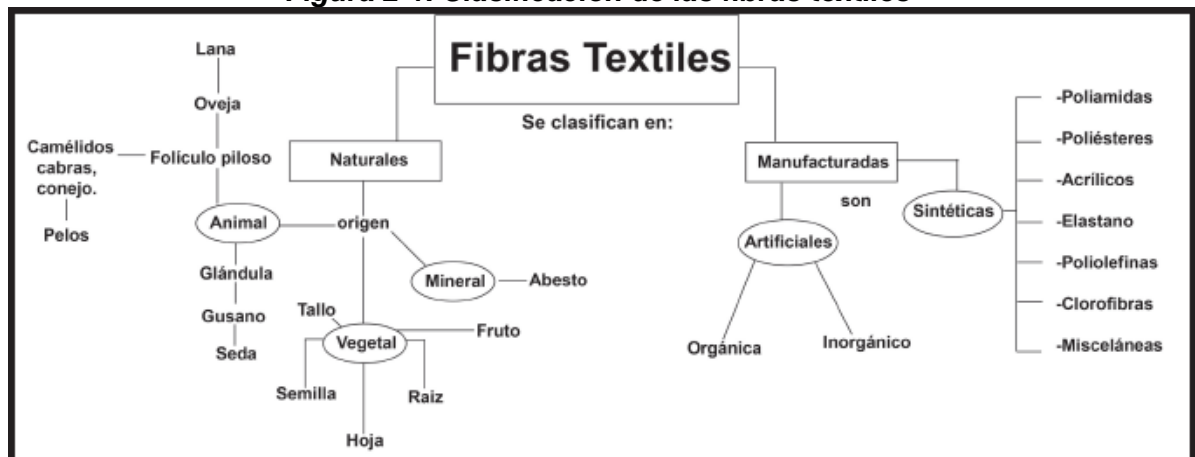
La fibra sintética es una fibra textil que se obtiene por síntesis orgánica de diversos productos derivados del petróleo. El poliéster se conoce por diversos nombres, de acuerdo al país en donde se produzca, o diversos componentes que sean usados en su fabricación.

HILO DE TERLENKA

Definición: Es un hilo o fibra textil sintética, compuesta por poliéster, formado por tres cabos trenzados, que a su vez están formados por dos hilos trenzados cada uno, en total son 6 cabos que crean una textura muy característica. Se deshilacha menos en los extremos que otros hilos, los extremos se queman muy bien para evitar el deshilachado porque es una fibra sintética. Es utilizado ampliamente en el campo textil y en actividades de bisutería. (MANUALIDADES Y BELLAS ARTES ON LINE SL., 2013-2017).

Clasificación: Las fibras textiles se clasifican en naturales y artificiales o manufacturadas. En el primer grupo se encuentran las fibras en estado natural. Su producción solo deriva de la preparación de las mismas, sin necesitar más que una ligera adecuación antes de ser hiladas para posteriormente ser utilizadas en la fabricación de telas. El segundo grupo está compuesto por las fibras que han sido producidas mediante procesos industriales, este grupo está conformado por las fibras elaboradas por procesos físicos y químicos, que hacen de ellas artificiales (Universidad del Azuay , 2014).

Figura 2-1. Clasificación de las fibras textiles



Tomado de: (Universidad del Azuay , 2014).

Fibras manufacturadas: Como su nombre lo indica, su obtención es a partir de la intervención del hombre y son creadas para adaptar sus características a cada uso específico, acoplando su producción a las necesidades del mercado. Se clasifican en: artificiales y sintéticas (Universidad del Azuay , 2014).

Fibras Sintéticas: Se obtienen por síntesis orgánica de diversos productos derivados del petróleo:

- Poliamidas
- Poliéster
- Acrílicos
- Elastano
- Poliolefinas
- Clorofibras
- Misceláneas

Las fibras sintéticas pueden ser clasificadas de acuerdo con su origen. En la Tabla 2-1 se presenta una síntesis de dicha clasificación.

Tabla 2-1. Composición y origen de las Fibras Sintéticas

NOMBRE DE FIBRA	ORIGEN
Celulósico	
Rayón	Borra de algodón o madera
Acetato	Borra de algodón o madera
Tre-acetato	Borra de algodón o madera
Polímeros no celulósico	
Nylon	Poliamida alifática
Aramida	Poliamida aromática
Poliéster	Ácido tereftálico y alcohol dihidrico
Acrílico	Acrilonitrilo
Nodacrílico	Acrilonitrilo
Spandex	Poliuretano
Olefinas	Etileno o propileno
Vinyon	Cloruro de Vinilo

NOMBRE DE FIBRA	ORIGEN
Saran	Cloruro de Vinilideno
Novoloid	Fenol base navolac
Policarbonato	Ácido carbonis (derivado del poliéster)
Fluorcarbón	Tetrafluoroetileno
Proteína	
Azlon	Maíz, frijol, etc.
Caucho	
Caucho	Caucho natural o sintético
Metálicos	
Metal	Aluminio, plata, oro, acero inoxidable
Minerales	
Cristal	Arena de sílice, piedra caliza, otros minerales

Tomado y adaptado de: (Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido).

El poliéster, la sustancia de formación de la fibra es cualquier polímero sintético de cadena larga compuesto por al menos 85% en peso de un éster de un ácido carboxílico aromático sustituido, pero no se limita a unidades de teraftalato sustituidos y unidades hidroxibenzoato de para-sustituidos (Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido).

En la producción de tales fibras, se polimerizan los elementos básicos de carbono, oxígeno e hidrógeno. Las variaciones son posibles en los métodos de producción, en la combinación de los ingredientes y en las últimas estructuras moleculares de la sustancia de formación de fibras (Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido).

Características:

- Termoplástico
- Buena fuerza
- Hidrófoba (no absorbente)

Aplicaciones:

- Ropa - tejidos y telas de punto, camisas, pantalones, chaquetas, sombreros, etc

- Sábanas, mantas, muebles tapizados, material de relleno - equipamiento casero
- Usos industriales - cintas transportadoras, cinturones de seguridad, de refuerzo de neumáticos

Propiedades de las Fibras Textiles de la Terlenka:

Los materiales fibrosos deben poseer ciertas propiedades para convertirse en un textil adecuado. Las propiedades que son aceptables para un textil pueden ser clasificadas en "propiedades primarias". Las otras propiedades que agregan especificaciones deseables de carácter o estética para el producto final y su uso se pueden clasificar como "propiedades secundarias". (Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido)

Propiedades Primarias:

1. Longitud
2. Tenacidad (fuerza)
3. Flexibilidad
4. Cohesión
5. Uniformidad de Propiedades

Propiedades Secundarias:

1. Forma física
2. Gravedad específica (influencia del peso, cobertura, etc.)
3. Recuperación de humedad y absorción (confort, electricidad estática, etc.)
4. Carácter elástico
5. Termoplasticidad (punto de remblandecimiento y calor - ajuste de carácter)
6. Propiedad de Teñido
7. Resistencia a solventes, corrosividad química, micro-organismos y condiciones ambientales
8. Flamabilidad
9. Lustre

Tabla 2-2. Propiedades físicas del Poliéster

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICAS
Apariencia Microscópica	Liso, uniforme, como vara, diferentes formas de sección
Longitud	Filamento
Color	Blanco

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICAS
Lustre	Brillante o mate
Fuerza	Buena a excelente
Elasticidad	Regular a buena
Resistencia	Excelente
Absorción de humedad	Menos del 1%
Calor	Reblandecimiento o se pega con temperaturas mayores a 204°C (400°F)
Inflamabilidad	Se quema lentamente
Conductividad eléctrica	Acumula carga estática

Tomado y adaptado de: *(Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido).*

Tabla 2-3. Propiedad de absorción de fibras de textil

FIBRA	RECUPERACIÓN DE HUMEDAD*
Algodón	7 – 11
Lino	12
Seda	11
Lana	13 – 18
Acetato	6.0
Acrílico	1.3 – 2.5
Aramida	4.5
Vidrio	0 – 0.3
Nylon	4.0 – 4.5
Poliéster	0.4 – 0.8
Rayón	15
Rayón HWM	11.5 – 13
Spandex	0.75 – 1.3

* La recuperación de humedad se expresa como porcentaje del peso libre de humedad a 70° Fahrenheit y 65% de humedad relativa

Tomado y adaptado de: *(Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido)*

Tabla 2-4. Propiedades Térmicas de fibras de textil

FIBRA	PUNTO DE FUSIÓN	PUNTO DE REBLANDECIMIENTO
Algodón	Sin fusión	- - -
Lino	Sin fusión	- - -
Seda	Sin fusión	- - -
Lana	Sin fusión	- - -
Acetato	230°C (446°F)	184°C (364°F)
Acrílico	- - -	204°C – 254°C (400°F – 490°F)
Aramida	No se fusiona. Se carboniza a temperaturas superiores a 426°C (800°F)	
Vidrio	- - -	760°C – 1660°C (1400°F – 3033°F)
Nylon 6	212°C (414°F)	171°C (340°F)
Nylon 66	250°C (482°F)	229°C (445°F)
Poliéster PET	249°C (480°F)	238°C (460°F)
Poliéster PCDT	311°C (550°F)	254°C (490°F)
Rayón	Sin fusión	- - -
Spandex	230°C (446°F)	175°C (347°F)

Tomado y adaptado de: **(Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido)**

Tabla 2-5. Efecto de ácidos en fibras de textil

FIBRA	COMPORTAMIENTO
Algodón	Se desintegra en calor diluido y ácidos minerales concentrados fríos
Lino	Se desintegra en calor diluido y ácidos concentrados fríos
Lana	Destruída por sulfúrico caliente, no afectada por ácidos
Seda	Los ácidos orgánicos no la dañan, pero los ácidos minerales concentrados la desintegran
Rayón	Se desintegra en calor diluido y ácidos concentrados fríos
Acetato	Soluble en ácido acético, descompuesto por ácidos fuertes

FIBRA	COMPORTAMIENTO
Tri-acetato	Soluble en ácido acético, descompuesto por ácidos fuertes
Nylon	Descompuesto por fuertes ácidos minerales, resistente a ácidos débiles
Poliéster	Resistente a la mayoría de los ácidos minerales, desintegrado por el ácido sulfúrico al 96%
Spandex	Resistente a la mayoría de los ácidos minerales, puede presentarse decoloración
Acrílico	Resistente a la mayoría de los ácidos
Vidrio	Resistente a la mayoría de los ácidos

Tomado y adaptado de: *(Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido)*.

Tabla 2-6. Efecto de los álcalis en fibras de textil

FIBRA	COMPORTAMIENTO
Algodón	No dañado por álcalis
Lino	Alta resistencia
Lana	Atacada por álcalis débiles, destruido por los más fuertes
Seda	Dañada únicamente bajo altas temperaturas y concentraciones
Rayón	Desintegrado en soluciones concentradas
Acetato	No afectado, a menos que se aplique alta concentración y temperatura
Tri-acetato	No afectado, a menos que se aplique alta concentración y temperatura
Nylon	Poco o sin efecto
Poliéster	Resistente a álcalis fríos, se descompone lentamente a ebullición por álcalis fuertes
Spandex	Afectado
Acrílico	Destruído a ebullición por álcalis fuertes, resistente a los más débiles
Vidrio	Atacado por álcalis débiles calientes y álcalis concentrados

Tomado y adaptado de: *(Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido)*

Tabla 2-7. Efecto de solventes orgánicos en fibras de textil

FIBRA	COMPORTAMIENTO
Algodón	Se oxida, torna amarillento y pierde fuerza tras larga exposición
Lino	Más resistente que el algodón, se deteriora gradualmente después de una exposición prolongada
Lana	Pierde fuerza después de una prolongada exposición
Seda	La debilita la exposición continua
Rayón	Generalmente resistente, pierde fuerza después de exposición prolongada
Acetato	Aproximadamente la misma que el rayón
Tri-acetato	Resistente, pierde fuerza después de exposición prolongada
Nylon	Buena resistencia
Poliéster	Buena resistencia
Spandex	Generalmente no afectado, la exposición prolongada lo debilita
Acrílico	Poco o sin efecto

Tomado y adaptado de: (Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido)

Tabla 2-8. Efecto del Moho en fibras de textil

FIBRA	COMPORTAMIENTO
Algodón	Afectado en condiciones de humedad
Lino	Afectado en condiciones de humedad
Lana	No susceptible en condiciones ordinarias, pero si en condiciones de humedad
Seda	No susceptible en condiciones ordinarias, pero si en condiciones de humedad
Rayón	Afectado en condiciones de humedad
Acetato	Altamente resistente
Tri-acetato	Resistencia extremadamente alta
Nylon	Sin efectos
Poliéster	Absolutamente resistente
Spandex	Resistencia buena a excelente
Acrílico	Se puede formar, pero no tiene efectos. Puede ser fácilmente removido

Tomado y adaptado de: (Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido)

Tabla 2-9. Efecto del calor en fibras de textil

FIBRA	COMPORTAMIENTO
Algodón	Resistente al calor moderado. Se quema y arde con prolongada exposición a calor elevado
Lino	Resistente al calor moderado. Se quema y arde con prolongada exposición a calor elevado
Lana	No es fácilmente combustible, se vuelve áspera a 100°C (212°F), se quema a 100°C (212°F) y eventualmente se carboniza a 204°C (400°F)
Seda	Sensible al calor, se descompone a 165°C (330°F)
Rayón	Se comporta de forma similar al algodón como una fibra celulósica
Acetato	Termoplástico en la naturaleza, se pone pegajoso a 176°C (350°F) y posteriormente se pone rígido
Tri-acetato	Termoplástico en la naturaleza, se pone pegajoso a 298°C (570°F) y posteriormente se pone rígido
Nylon	Se derrite a altas temperaturas. El Nylon 6 se funde a 215°C (420°F) y el Nylon 6.6 a 248°C (480°F)
Poliéster	Se funde bajo altas temperaturas. Se vuelve pegajoso entre 226°C y 243°C (440°F – 470°F) y se funde y arde en llama entre 248°C y 290°C (480°F – 554°F) dependiendo del tipo
Spandex	Amarillento, pierde elasticidad y resistencia a más de 148°C (300°F), se pega a 175°C (347°F) y se funde a 230°C (446°F)
Acrílico	Se vuelve pegajoso a 229°C (445°F) y se funde a una temperatura más alta

Tomado y adaptado de: (Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido)

2.3 MARCO NORMATIVO

La entidad estatal que es autoridad en construcción de carreteras para Colombia es el Instituto Nacional de Vías - INVIAS, por lo cual este estudio se rige por lo que esta entidad dispone en el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras – 2013 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS , 2013). En la Tabla 2-10 se presenta una lista de las normas de ensayos de laboratorio que específicamente se relacionan con el presente trabajo de grado.

Tabla 2-10. Normas de ensayos relevantes para el desarrollo de la investigación

NORMA	DESCRIPCIÓN
INV E – 213 – 13	Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino
INV E – 218 – 13	Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm Por medio de la máquina de los ángeles
INV E – 224 – 13	Determinación del valor del 10% de finos
INV E – 227 – 13	Porcentaje de Partículas fracturadas en un agregado grueso.
INV E – 235 – 13	Valor de azul de metileno en agregados finos
INV E – 238 – 13	Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro - Deval
INV E – 725 – 13	Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta.
INVE – 733 – 13	Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos
INVE – 735 – 13	Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos.
INVE – 736 – 13	Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas
INVE – 738 – 13	Efecto del agua sobre la resistencia a la compresión de las mezclas Asfálticas compactadas (Ensayo de Inmersión – Compresión).
INV E – 747 – 13	Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas.
INV E – 748 – 13	Estabilidad y flujo de Mezclas Asfálticas En caliente Empleando el Equipo Marshall.

Fuente: Propia

De forma similar, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS dispone de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (INVIAS, 2013), las cuales consignan los requisitos generales de las actividades y materiales a ser utilizados en la construcción de una vía, incluyendo lo relacionado con la construcción de mezclas asfálticas para estructuras de pavimento. En particular, para la presente investigación, las Especificaciones indicadas en la Tabla 2-11, tienen mayor importancia.

Tabla 2-11. Especificaciones de Construcción relevantes para el desarrollo de la investigación

ESPECIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Artículo 400	Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos
Artículo 450	Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico).

Fuente: Propia

3 DEFINICIÓN DEL PLAN DE ENSAYOS

El Plan de Ensayos establecido para la investigación inicia con los ensayos requeridos para la caracterización de los elementos que serán utilizados en la elaboración de la mezcla asfáltica, tanto la convencional, como la modificada. Por lo tanto, inicialmente se contemplan los ensayos de caracterización de los agregados.

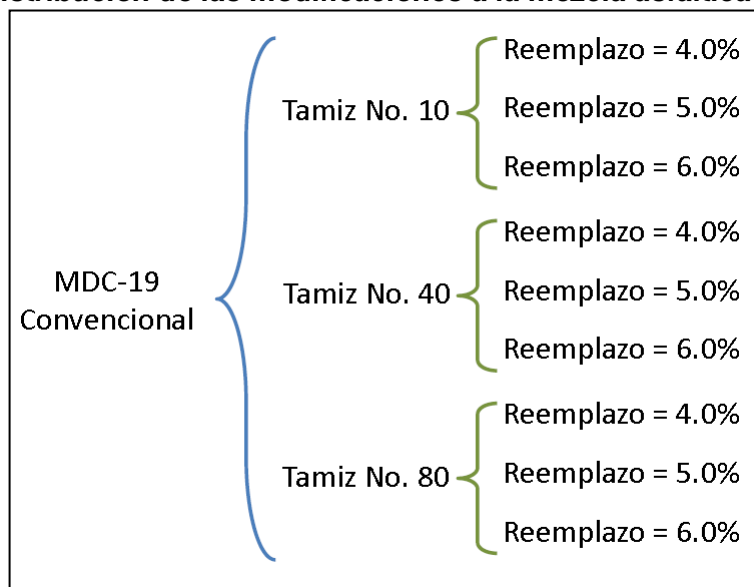
Posteriormente se lleva a cabo el diseño de la mezcla asfáltica convencional, el cual se realiza a partir de los resultados obtenidos en los Ensayos Marshall para diferentes dosificaciones de asfalto, a partir de lo cual se llega a la definición del porcentaje óptimo de asfalto que debe tener la mezcla asfáltica, junto con las otras características de la mezcla: peso unitario, volumen de vacíos, etc.

Para la mezcla modificada, una vez analizada la información obtenida de investigaciones anteriores acerca de mezclas asfálticas con adiciones de terlenka, especialmente aquella realizada por (Z. Basto, 2016), se estableció que un comportamiento mecánico similar o superior al de una mezcla convencional podría obtenerse con el reemplazo de franjas granulométricas por debajo del tamiz No. 4.

Así mismo, el porcentaje de reemplazo en peso de los agregados debería estar alrededor del 5.0%, ya que para porcentajes de reemplazo mayores, las investigaciones arrojaron resultados negativos en cuanto al comportamiento mecánico de las mezclas con inclusión de Terlenka.

Con base en dichos hallazgos, el plan de ensayos definido para la presente investigación consistió en el reemplazo de las franjas granulométricas correspondientes al tamiz No. 10, al tamiz No. 40 y al tamiz No. 80. Los porcentajes de reemplazo definidos consistieron en el 4.0%, 5.0% y 6.0% para cada una de las franjas granulométricas analizadas. En la Figura 3-1 se presenta de forma gráfica las modificaciones de la mezcla teniendo en cuenta el reemplazo de agregados por terlenka.

Figura 3-1. Distribución de las modificaciones a la mezcla asfáltica convencional.



Fuente: Propia.

En total se estableció la evaluación de 9 mezclas modificadas que se someterían a ensayos Marshall para determinar la Estabilidad y el Flujo a través del Ensayo Marshall (INV E – 748 – 13).

A partir de los resultados obtenidos en este ensayo se lleva a cabo la comparación con los resultados obtenidos para la mezcla asfáltica convencional, de tal forma que se establece en qué casos se obtuvo un comportamiento mecánico similar o mejor, en términos de Estabilidad y Flujo.

Con base en dicha comparación se aplicaría un criterio de selección sobre las mezclas modificadas para identificar aquellas que se someterían a ensayos posteriores. Este criterio sencillo consistió en que las tres (3) mezclas que ofrecieran mejores resultados de comportamiento mecánico (en términos de estabilidad y flujo) se someterían a un ensayo posterior de tracción indirecta, siempre que los resultados obtenidos fueran mejores que los de la mezcla convencional.

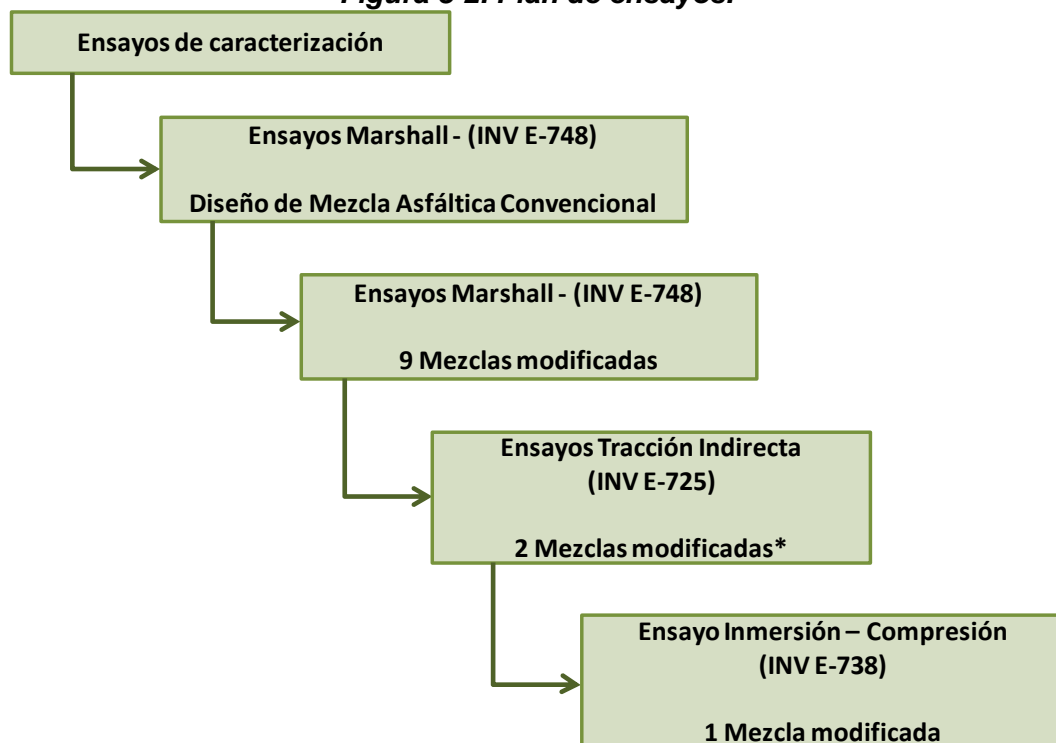
Si los resultados del ensayo Marshall sobre una mezcla modificada eran menores a los de la mezcla convencional, la mezcla modificada en la franja granulométrica y con el porcentaje de reemplazo establecido, se descartaba para posteriores ensayos, teniendo en cuenta que no se obtenía un comportamiento mecánico por lo menos similar al de la mezcla convencional.

En términos prácticos, la aplicación del criterio condujo a la selección de solo dos tipos de mezclas modificadas para los ensayos de tracción indirecta (INVE – 725 – 13): Las mezclas con reemplazo en la franja granulométrica sobre el tamiz 80, con porcentajes de reemplazo del 4.0% y del 5.0%. Las demás mezclas arrojaron resultados por debajo de los establecidos para la mezcla convencional.

De forma similar, a partir de los resultados del ensayo de Estabilidad y Flujo se realizó la selección de la mezcla modificada que se sometió al ensayo de Inmersión-Compresión. Para este caso, teniendo en cuenta el costo del ensayo y las limitaciones económicas de la investigación, solo un tipo de mezcla modificada se sometió al ensayo, la cual correspondió a la mezcla con reemplazo en el tamiz No. 80 con un porcentaje del 4.0%, la cual presentó el mayor valor de Estabilidad.

En la Figura 3-2 se presenta de forma gráfica el plan de ensayos definido para la presente investigación.

Figura 3-2. Plan de ensayos.



Fuente: Propia

De forma similar, en la Tabla 3-1 se presenta un resumen de la cantidad de briquetas elaboradas para cada uno de los ensayos propuestos dentro de la investigación.

Tabla 3-1. Número de briquetas por ensayo contempladas en la investigación

Ensayo	Cantidad Briquetas
Diseño de Mezcla (Marshall) de acuerdo con la INV E-748.	20
Ensayos Estabilidad-Flujo en la mezcla modificada (INV E-748) (5 por cada tipo de mezcla)	45
Ensayos Tracción Indirecta (INV E-725) Incluye ensayos sobre la mezcla convencional	18
Ensayos Inmersión-Compresión (INV E-738) Incluye ensayos sobre la mezcla convencional	12

Fuente: Propia

4 RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

De acuerdo con el plan de ensayos definido en el numeral anterior, el primer grupo de pruebas consiste en la ejecución de los ensayos de caracterización de los materiales que hacen parte de la mezcla asfáltica, principalmente, de los agregados.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

La caracterización de los agregados se realizó de acuerdo con las exigencias consignadas en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVIAS (INVIAS, 2013), que en el artículo 450 indica los requerimientos de los agregados para mezclas asfálticas continuas.

4.1.1 Limpieza – Gradación Combinada

Equivalente de Arena

El ensayo de equivalente de arena se realizó sobre el material de arena natural, el material de arena de trituración y la combinación de los materiales, de acuerdo con la norma Norma INV E-133 (INVIAS , 2013). Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Resultados Ensayo de Equivalente de Arena (Norma INV E-133)

ARENA NATURAL			
Prueba No.	No.1	No. 2	No. 3
Lectura de Arcilla (A)	4.0	4.1	4.2
Lectura de Arena (B)	3.6	3.8	3.9
Equivalente de Arena (B/A)	90%	93%	93%
PROMEDIO			92%
ARENA DE TRITURACIÓN			
Prueba No.	No.1	No. 2	No. 3
Lectura de Arcilla (A)	4.2	4.2	4
Lectura de Arena (B)	3.5	3.4	3.3
Equivalente de Arena (B/A)	83%	81%	83%
PROMEDIO			82%

COMBINACIÓN DE AGREGADOS FINOS			
Prueba No.	No.1	No. 2	No. 3
Lectura de Arcilla (A)	4.2	4.3	4.1
Lectura de Arena (B)	3.7	3.8	3.5
Equivalente de Arena (B/A)	88%	88%	85%
PROMEDIO			87%

Fuente: Propia

Azul de Metileno

Sobre los agregados también se realizó la medición de la limpieza por medio del ensayo Valor de azul de metileno en agregados finos (INV E-233), con el cual se obtuvo un valor de azul de metileno de 3.4%, que está dentro del límite dado en las Especificaciones de Construcción que exigen un valor máximo de 10% independiente de la capa en la cual se utilizan los agregados. Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Resultados Valor de azul de metileno en agregados finos (INV E-233)

Peso de azul de metileno (g)	6.8
Peso suelo seco (g)	200.1
Índice de azul de metileno (%)	3.40%

Fuente: Propia

4.1.2 Geometría de las Partículas

Agregado Grueso

Para establecer la condición de geometría de las partículas de los agregados gruesos se realizaron los ensayos de Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras de acuerdo con la Norma INV E-230 y de Porcentaje de Partículas Fracturadas en Agregado Grueso, de acuerdo con la Norma INV E-227 (INVIAS , 2013).

Los resultados del Ensayo para determinar los índices de aplanamiento y alargamiento se presentan en la Tabla 4-3. Los resultados del ensayo para las fracciones de tamaños $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ " se presentan en la Tabla 4-4.

Tabla 4-3. Resultados Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras (Norma INV E-230)

INDICE DE APLANAMIENTO						
Tamices		Peso Material	Peso Partículas	% Partículas	% Retenido	Caras
Pasa	Retiene	Fracción (A)	Fracturadas (B)	Fracturadas (C)	Original (D)	Fracturadas $E=(C*D)$
1 1/2"	1"	-	-	-	-	-
1"	3/4"	1140.0	123.0	10.8%	12.3%	132.7
3/4"	1/2"	1174.0	135.0	11.5%	17.2%	197.8
1/2"	3/8"	0.0	45.0	0.0	8%	0.0
TOTALES				22.3%	37.5%	330.5
TOTAL PONDERADO						9%
INDICE DE ALARGAMIENTO						
Tamices		Peso Material	Peso Partículas	% Partículas	% Retenido	Caras
Pasa	Retiene	Fracción (A)	Fracturadas (B)	Fracturadas (C)	Original (D)	Fracturadas $E=(C*D)$
1 1/2"	1"	-	-	-	-	-
1"	3/4"	1140.0	108.0	9.5%	9.5%	90.0
3/4"	1/2"	1174.0	112.0	9.5%	9.5%	90.6
1/2"	3/8"	0.0	42.0	0.0	14%	0.0
TOTALES				19.0%	32.5%	180.6
TOTAL PONDERADO						6%

Fuente: Propia

Tabla 4-4. Resultados Ensayo de Partículas Fracturadas – Agregado Grueso (Norma INV E-227)

COMBINACION AGREGADO GRUESO 3/4"						
Tamices		Peso Material	Peso Partículas	% Partículas	% Retenido	Caras
Pasa	Retiene	Fracción (A)	Fracturadas (B)	Fracturadas (C)	Original (D)	Fracturadas $E=(C*D)$
1 1/2"	1"	-	-	-	-	-
1"	3/4"	1140.0	1020.0	89.5%	47.7%	4267.9
3/4"	1/2"	1174.0	1075.0	91.6%	50.4%	4615.0
1/2"	3/8"	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTALES				181.0%	98.1%	8882.9
TOTAL PONDERADO						91%

COMBINACION AGREGADO GRUESO 1/2"						
<i>Tamices</i>		<i>Peso Material</i>	<i>Peso Partículas</i>	<i>% Partículas</i>	<i>% Retenido</i>	<i>Caras</i>
<i>Pasa</i>	<i>Retiene</i>	<i>Fracción (A)</i>	<i>Fracturadas (B)</i>	<i>Fracturadas (C)</i>	<i>Original (D)</i>	<i>Fracturadas E=(C*D)</i>
1 1/2"	1"	-	-	-	-	-
1"	3/4"	-	-	-	-	-
3/4"	1/2"	1239.0	1161.0	93.7%	7.5%	702.8
1/2"	3/8"	374.0	299.0	79.9%	19.4%	1550.1
TOTALES				173.6%	26.9%	2252.8
TOTAL PONDERADO						94%

Fuente: Propia

Las Especificaciones de Construcción indican que el porcentaje de caras fracturadas debe ser mayor al 85% en el caso más exigente (mezcla para rodadura con un nivel de tránsito NT3), de tal forma que a partir de los resultados obtenidos (mayores al 90%), se establece que los agregados cumplen con el requerimiento.

4.1.3 Dureza

La dureza de los agregados se estableció con los ensayos de Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5mm (1 1/2") por medio de la Máquina de Los Ángeles (INV E-218) y Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval (INV E-238).

La Tabla 4-5 presenta los resultados obtenidos en el ensayo de degradación en la Máquina de Los Ángeles, los cuales cumplen con la Especificación de Construcción para un nivel de tránsito NT2 y una capa de intermedia ya que los valores de desgaste para 500 revoluciones son menores a 35% en promedio y para 100 revoluciones son menores a 7%.

Los resultados del ensayo Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval (INV E-238) se presentan en la Tabla 4-6. Nuevamente se observa que el material cumple con las exigencias plasmadas en la Especificación de Construcción, ya que los valores máximos permitidos para un nivel de tránsito NT2 son de 25% para una capa de rodadura y de 30 para una capa intermedia o de base.

Tabla 4-5. Resultados Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5mm (1 ½") por medio de la Máquina de Los Ángeles (INV E-218)

Tipo de Agregado	TM 1/2"	TM 1/2"	TM 1/2"	TM 3/4"	TM 3/4"	TM 3/4"
Muestra No.	1	2	3	4	5	6
Gradación Usada	B	B	B	B	B	B
No. De esferas	11	11	11	11	11	11
No. De Revoluciones	500	500	100	500	500	100
Pa = Peso muestra seca inicial	5004	5003	5001	4999	5001	5003
Pb = Peso muestra seca final	3817	3116	4804	3892	3451	4856
Perdida Pa - Pb	1187	1887	197	1107	1550	147
% Desgaste (Pa-Pb)/Pa	23.7	37.7	3.9	22.1	31.0	2.9
Especificación (Máximo)	30	50	5	30	50	5
Relación Húmedo / Seco	1.59			1.4		

Fuente: Propia.

Tabla 4-6. Resultados Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval (INV E-238)

Tipo de agregado	TM 1/2"	TM 3/4"
Muestra No.	1	2
Masa de esferas	B	B
Tiempo de saturación (horas)	11	11
No. De revoluciones	500	500
Pa = Peso muestra seca inicial (g)	5004	5002
Pb = Peso muestra seca final (g)	3824	3806
Pérdida = Pa - Pb	1180	1196
% Desgaste (Pa - Pb)/Pa	23.6%	23.9%
% Máximo según especificación	30	30

Fuente: Propia.

4.1.4 Granulometría

Sobre los diferentes tipos de agregados utilizados para la elaboración de las mezclas asfálticas, se llevaron a cabo los análisis granulométricos, de acuerdo con lo indicado en la norma INV E-213. Los resultados se presentan entre la Tabla 4-7 y la Tabla 4-10.

Tabla 4-7. Análisis granulométrico del material grava de 3/4" (INV E-238)

PESO INICIAL (g)		620			
APERTURA		PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
(mm)	(pulg)	(g)			
25.4	1	0	0	0	100%
19.1	3/4	295.8	47.7%	47.7%	52.3%
12.7	1/2	312.2	50.4%	98.1%	1.9%
9.52	3/8	0	0.0%	98.1%	1.9%
4.76	No. 4	0	0.0%	98.1%	1.9%
2.00	No. 10	0	0.0%	98.1%	1.9%
0.42	No. 40	0	0.0%	98.1%	1.9%
0.177	No. 80	0	0.0%	98.1%	1.9%
0.074	No. 200	0	0.0%	98.1%	1.9%
Fondo		12	1.9%	100.0%	0.0%

Fuente: Propia.

Tabla 4-8. Análisis granulométrico del material grava de 1/2" (INV E-238)

PESO INICIAL (g)		1150.2			
APERTURA		PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
(mm)	(pulg)	(g)			
25.4	1	0	0	0	100%
19.1	3/4	11	1.0%	1.0%	99.0%
12.7	1/2	86.4	7.5%	8.5%	91.5%
9.52	3/8	223.5	19.4%	27.9%	72.1%
4.76	No. 4	737.1	64.1%	92.0%	8.0%
2.00	No. 10	80.9	7.0%	99.0%	1.0%
0.42	No. 40	2.1	0.2%	99.2%	0.8%
0.177	No. 80	1	0.1%	99.3%	0.7%
0.074	No. 200	3.4	0.3%	99.6%	0.4%
Fondo		4.8	0.4%	100.0%	0.0%

Fuente: Propia.

Tabla 4-9. Análisis granulométrico del material arena natural (INV E-238)

PESO INICIAL (g)		488			
APERTURA		PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
(mm)	(pulg)	(g)			
25.4	1	0	0	0	100%
19.1	3/4	0	0.0%	0.0%	100.0%
12.7	1/2	0	0.0%	0.0%	100.0%
9.52	3/8	2.7	0.6%	0.6%	99.4%
4.76	No. 4	34.6	7.1%	7.6%	92.4%
2.00	No. 10	102.1	20.9%	28.6%	71.4%
0.42	No. 40	224.1	45.9%	74.5%	25.5%
0.177	No. 80	85.7	17.6%	92.0%	8.0%
0.074	No. 200	28.9	5.9%	98.0%	2.0%
Fondo		9.7	2.0%	100.0%	0.0%

Fuente: Propia.

Tabla 4-10. Análisis granulométrico del material arena de trituración (INV E-238)

PESO INICIAL (g)		720.4			
APERTURA		PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
(mm)	(pulg)	(g)			
25.4	1	0	0	0	100%
19.1	3/4	0	0.0%	0.0%	100.0%
12.7	1/2	0	0.0%	0.0%	100.0%
9.52	3/8	0	0.0%	0.0%	100.0%
4.76	No. 4	28.1	3.9%	3.9%	96.1%
2.00	No. 10	315	43.7%	47.6%	52.4%
0.42	No. 40	235.4	32.7%	80.3%	19.7%
0.177	No. 80	60.7	8.4%	88.7%	11.3%
0.074	No. 200	46.1	6.4%	95.1%	4.9%
Fondo		35.1	4.9%	100.0%	0.0%

Fuente: Propia.

4.2 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

El diseño de la mezcla asfáltica convencional se llevó a cabo siguiendo la metodología Marshall, en línea con las exigencias de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, para un nivel de Tránsito NT2, y de acuerdo con la norma de ensayo INV E-748, para lo cual se fabricaron 20 briquetas con contenidos de asfalto entre el 4.5% y el 6.0% (5 briquetas por cada contenido de asfalto).

La temperatura de elaboración de la mezcla fue de 150°C y se realizó la compactación con temperaturas oscilando entre los 135°C y los 140°C, empleando 75 golpes por capa. El tipo de cemento asfáltico empleado corresponde al que presenta una penetración 60-70, con una gravedad específica (Gs) de 1.012. La gravedad específica de los agregados utilizados es de 2.57.

Los resultados de los ensayos de estabilidad y flujo para cada una de las probetas teniendo en cuenta las diferentes dosificación de asfalto indicadas anteriormente, se presentan desde la Tabla 4-11 hasta la Tabla 4-14.

**Tabla 4-11. Resultados Ensayo Estabilidad y Flujo – Contenido de Asfalto 4.5%
(Norma INV E-748)**

No. Briqueta	h briqueta (mm)	Briqueta Seca en el Aire (g)	Briqueta SSS en el aire (g)	Briqueta Sumergida agua (g)	Gravedad Bulk	Peso Unitario (g/cm ³)	Estabilidad Medida (kg)	Factor de Corrección	Estabilidad Corregida (kg)	Flujo (mm)
1	65	1190	1194	665	2.267	2.267	1063.76	0.965	1026.53	3.683
2	65	1197	1201	670	2.271	2.272	1104.67	0.965	1066.01	3.556
3	65	1191	1194	667	2.273	2.273	1043.30	0.965	1006.79	3.683
4	65	1193	1196	667	2.268	2.268	1104.67	0.965	1066.01	3.556
5	65	1190	1193	665	2.267	2.267	1022.85	0.965	987.05	3.556

Fuente: Propia.

Tabla 4-12. Resultados Ensayo Estabilidad y Flujo – Contenido de Asfalto 5.0%
(Norma INV E-748)

No. Briqueta	h briqueta (mm)	Briqueta Seca en el Aire (g)	Briqueta SSS en el aire (g)	Briqueta Sumergida a agua (g)	Gravedad Bulk	Peso Unitario (g/cm ³)	Estabilidad Medida (kg)	Factor de Corrección	Estabilidad Corregida (kg)	Flujo (mm)
6	66	1186	1190	672	2.307	2.308	1268.33	0.945	1198.57	3.810
7	65	1183	1186	670	2.306	2.306	1247.87	0.965	1204.20	3.683
8	64	1189	1192	673	2.304	2.305	1227.41	0.980	1202.87	3.810
9	65	1190	1193	673	2.302	2.302	1268.33	0.965	1223.94	3.810
10	65	1185	1186	670	2.301	2.301	1227.41	0.965	1184.46	3.683

Fuente: Propia

Tabla 4-13. Resultados Ensayo Estabilidad y Flujo – Contenido de Asfalto 5.5%
(Norma INV E-748)

No. Briqueta	h briqueta (mm)	Briqueta Seca en el Aire (g)	Briqueta SSS en el aire (g)	Briqueta Sumergida a agua (g)	Gravedad Bulk	Peso Unitario (g/cm ³)	Estabilidad Medida (kg)	Factor de Corrección	Estabilidad Corregida (kg)	Flujo (mm)
11	65	1197	1200	676	2.298	2.298	1206.96	0.965	1164.71	3.810
12	65	1192	1195	673	2.297	2.297	1227.41	0.965	1184.46	3.810
13	65	1190	1193	672	2.297	2.298	1166.04	0.965	1125.23	3.810
14	65	1196	1199	676	2.300	2.300	1186.50	0.965	1144.97	3.810
15	65	1194	1197	675	2.301	2.301	1186.50	0.965	1144.97	3.810

Fuente: Propia

Tabla 4-14. Resultados Ensayo Estabilidad y Flujo – Contenido de Asfalto 6.0%
(Norma INV E-748)

No. Briqueta	h briqueta (mm)	Briqueta Seca en el Aire (g)	Briqueta SSS en el aire (g)	Briqueta Sumergida a agua (g)	Gravedad Bulk	Peso Unitario (g/cm ³)	Estabilidad Medida (kg)	Factor de Corrección	Estabilidad Corregida (kg)	Flujo (mm)
16	64	1200	1201	676	2.290	2.290	1186.50	0.980	1162.77	4.064
17	64	1197	1198	674	2.289	2.289	1186.50	0.980	1162.77	4.191
18	64	1198	1199	675	2.291	2.291	1104.67	0.980	1082.58	4.064
19	65	1197	1199	675	2.293	2.293	1125.13	0.965	1085.75	4.064
20	64	1197	1198	674	2.289	2.289	1145.59	0.980	1122.68	4.191

Fuente: Propia

En la Tabla 4-15 se presentan los promedios consolidados, obtenidos en cada uno de los ensayos realizados de acuerdo con la dosificación de asfalto indicada.

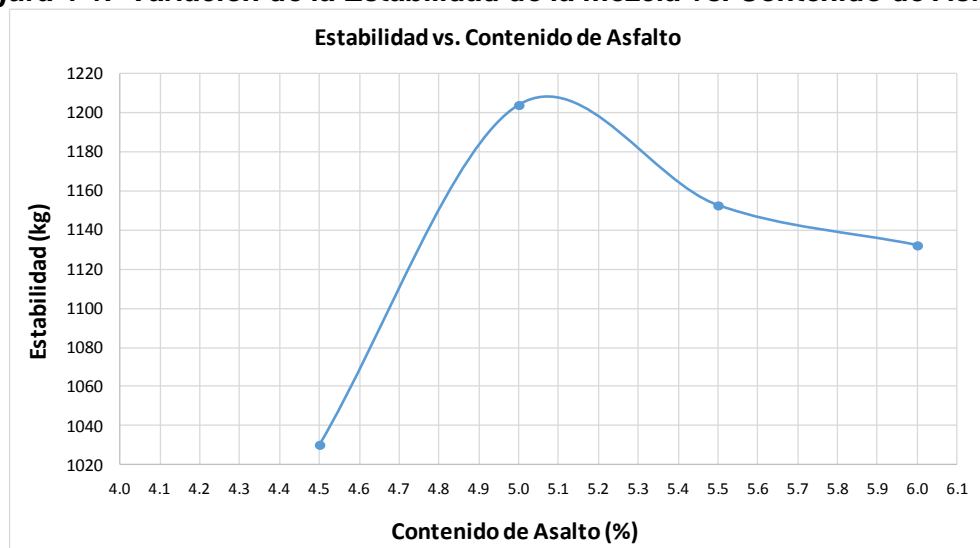
Tabla 4-15. Promedio Estabilidad y Flujo para diseño de mezcla

% asfalto	h briqueta (mm)	Briqueta Seca en el Aire (g)	Briqueta SSS en el aire (g)	Briqueta Sumergida agua (g)	Gravedad Bulk	Gmt	Agregados Vsb	% Vacíos Agregados Minerales	Peso Unitario (g/cm ³)	Estabilidad Corregida (kg)	Flujo (mm)
4.5	65.0	1192.2	1195.6	666.8	2.269	2.403	84.322	15.678	2.269	1030.48	3.607
5.0	65.0	1186.6	1189.4	671.6	2.304	2.386	85.172	14.828	2.304	1204.20	3.759
5.5	65.0	1193.8	1196.8	674.4	2.298	2.369	84.516	15.484	2.299	1152.87	3.810
6.0	64.2	1197.8	1199	674.8	2.290	2.353	83.769	16.231	2.290	1132.43	4.115

Fuente: Propia

La Figura 4-1 muestra la variación de los valores de estabilidad promedio de acuerdo con el contenido de asfalto de la mezcla. Se observa que los valores obtenidos están en línea con los requerimientos de la Especificación – Artículo 450 – Tabla 450-10 (INVIAS, 2013), que establece un valor mínimo de 7500N (765kg) para la Estabilidad de una mezcla asfáltica en caliente de gradación continua para un Nivel de Tránsito NT2.

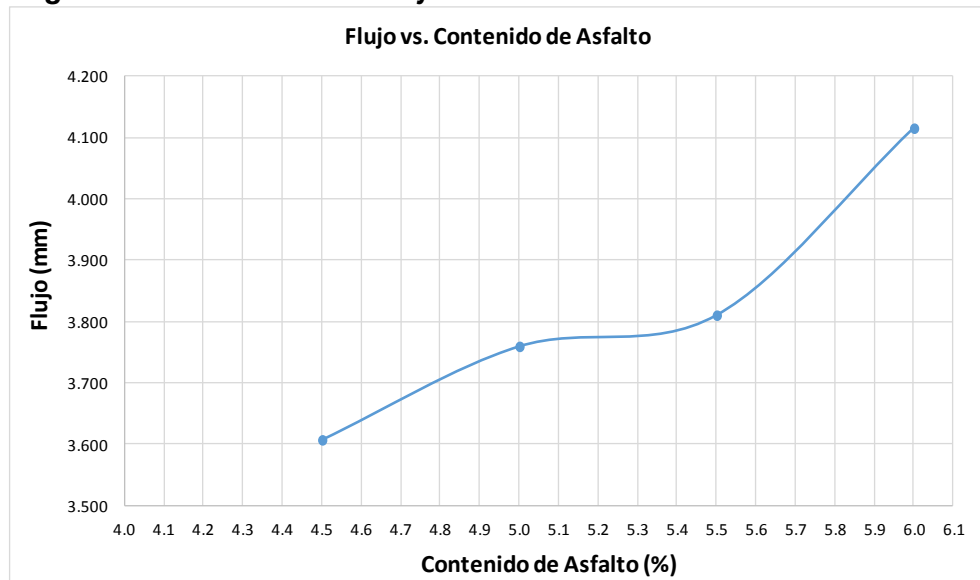
Figura 4-1. Variación de la Estabilidad de la mezcla vs. Contenido de Asfalto



Fuente: Propia

De igual manera, en la Figura 4-2 se puede observar la variación de los valores promedio de flujo para cada valor de contenido de asfalto analizado. Se destaca que para el contenido de asfalto del 6.0%, el valor de flujo sobrepasa el rango estipulado en las Especificaciones de Construcción – Artículo 450 – Tabla 450-10 (INVIAS, 2013), donde para un nivel de tránsito NT2, el Flujo debe estar en el rango de 2.0mm a 4.0mm. Por lo tanto, de entrada se descarta un contenido de asfalto con ese valor para el diseño de mezcla.

Figura 4-2. Variación del Flujo de la mezcla vs. Contenido de Asfalto

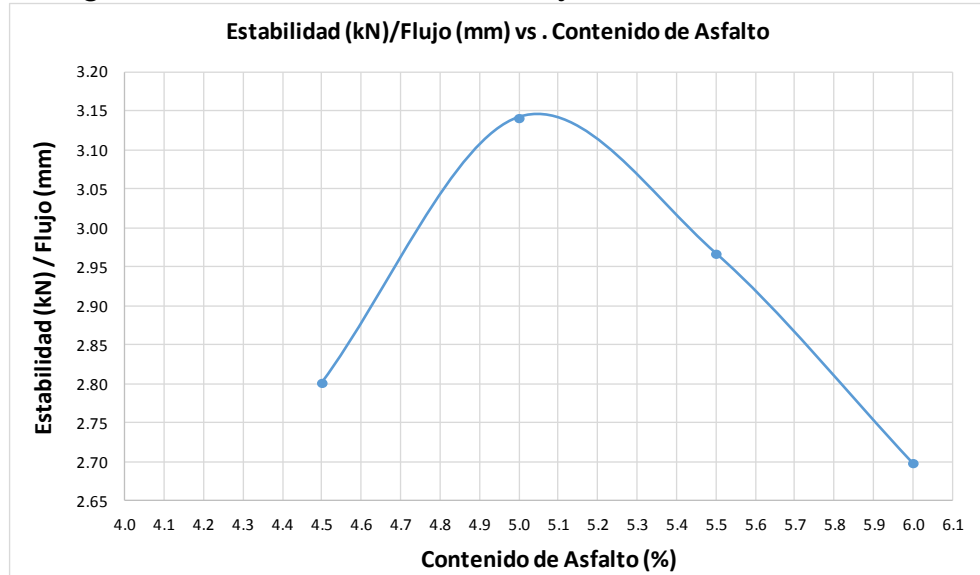


Fuente: Propia

Otro aspecto que resulta importante dentro del diseño de la mezcla corresponde a la relación entre los valores de Estabilidad y Flujo para cada contenido de asfalto, cuyo comportamiento se encuentra plasmado en la Figura 4-3. Se observa claramente que la mejor relación está alrededor de un contenido de asfalto entre el 5.0% y el 5.1%.

También es importante señalar que los valores de la relación Estabilidad / Flujo obtenidos en las mezclas con contenidos de asfalto de 4.5%, 5.5% y 6.0% están ligeramente bajo el límite inferior exigido por las Especificaciones de Construcción – Artículo 450 – Tabla 450-10 (INVIAS, 2013), que corresponde a 3.0. Sin embargo, la mezcla con un contenido de asfalto del 5.0% cumple con el requerimiento anterior.

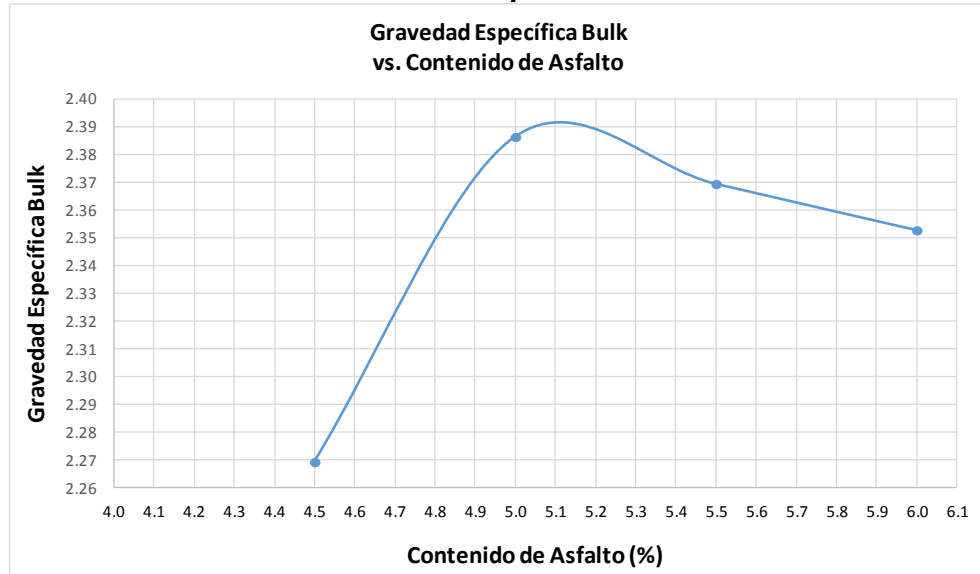
Figura 4-3. Relación Estabilidad/Flujo vs. Contenido de Asfalto



Fuente: Propia

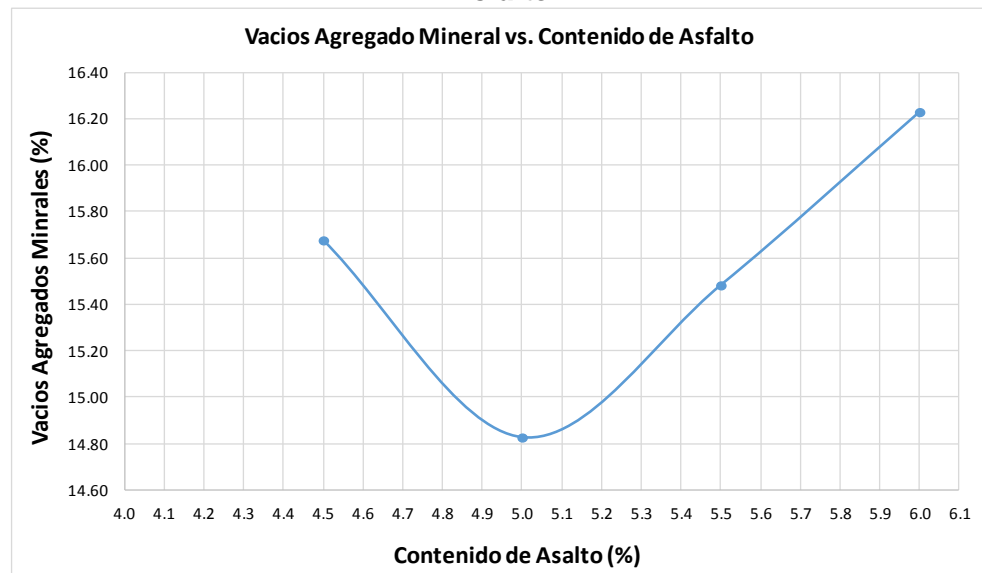
Finalmente, también se establece el comportamiento de la Gravedad Específica Bulk con respecto al contenido de asfalto de cada tipo de mezcla. En la Figura 4-4 se observa dicho comportamiento a partir de los resultados obtenidos. El contenido de vacíos de los agregados minerales se presenta en la Figura 4-5.

Figura 4-4. Variación de la Gravedad Especifica Bulk vs. Contenido de Asfalto



Fuente: Propia

Figura 4-5. Variación de los Vacíos de los Agregados Minerales vs. Contenido de Asfalto



Fuente: Propia

Con base en los comportamientos obtenidos para la Estabilidad, Flujo y la relación Estabilidad/Flujo, así como la variación de la Gravedad Específica Bulk, se estableció que el porcentaje óptimo de asfalto que se debe incorporar en mezcla asfáltica convencional es del 5.0%.

4.3 ENSAYOS DE ESTABILIDAD Y FLUJO SOBRE MEZCLAS CON ADICIÓN DE TERLENKA

A partir del valor de contenido óptimo de asfalto definido para la mezcla convencional, se fabricaron las briquetas con la inclusión de Terlenka, reemplazando franjas granulométricas en los tamices No. 10, No. 40 y No. 80, con porcentajes de reemplazo del 4.0%, 5.0% y 6.0% en cada caso, de acuerdo con lo establecido con anterioridad en el Plan de Ensayos, para un total de nueve (9) diferentes tipos de mezclas modificadas con la adición de Terlenka.

Para cada tipo de mezcla se fabricaron cinco (5) briquetas, las cuales se sometieron al Ensayo de Estabilidad y Flujo en Mezclas Asfálticas en Caliente empleando el Equipo Marshall (INV E-748).

Para las briquetas con reemplazo de agregados en la fracción correspondiente al Tamiz No. 10, los resultados de los ensayos de Estabilidad y Flujo se presentan

en la Tabla 4-16 (reemplazo del 4.0%), en la Tabla 4-17 (reemplazo del 5.0%) y en la Tabla 4-18 (reemplazo del 6.0%).

Tabla 4-16. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 10 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 10 – Proporción de Reemplazo = 4.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm ³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
1066.13	3.810	279.82	7.0	1197	640	1201.0	2.134	78.87	2.39	10.59	10.54	21.13
1107.13	3.810	290.59	7.0	1188	641	1196.0	2.141	79.13	2.39	10.30	10.58	20.87
1045.63	3.810	274.44	7.1	1196	641	1202.0	2.132	78.81	2.39	10.66	10.53	21.19
1066.13	3.810	279.82	7.0	1190	640	1195.0	2.144	79.26	2.39	10.15	10.59	20.74
1127.64	3.937	286.42	7.0	1193	639	1198.0	2.134	78.89	2.39	10.57	10.54	21.11
VALORES PROMEDIO												
1082.53	3.835	282.22	7.02	1192.8	640.2	1198.4	2.137	78.99	2.39	10.45	10.56	21.01

Fuente: Propia

Tabla 4-17. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 10 – Proporción de Reemplazo = 5.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 10 – Proporción de Reemplazo = 5.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm ³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
1045.63	3.683	283.91	7.2	1197.0	638.0	1204.0	2.115	78.18	2.39	11.38	10.45	21.82
1004.62	3.810	263.68	7.3	1192.0	635.0	1199.0	2.113	78.12	2.39	11.43	10.44	21.88
1086.63	3.683	295.04	7.2	1194.0	637.0	1202.0	2.113	78.12	2.39	11.44	10.44	21.88
1066.13	3.683	289.47	7.3	1198.0	640.0	1205.0	2.120	78.38	2.39	11.15	10.48	21.62
1004.62	3.683	272.77	7.2	1191.0	637.0	1199.0	2.119	78.34	2.39	11.19	10.47	21.66
VALORES PROMEDIO												
1041.52	3.708	280.97	7.24	1194.4	637.4	1201.8	2.116	78.23	2.39	11.32	10.46	21.77

Fuente: Propia

Tabla 4-18. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 10 – Proporción de Reemplazo = 6.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 10 – Proporción de Reemplazo = 6.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
820.10	5.080	161.44	7.3	1190.0	632.0	1196.0	2.110	77.99	2.39	11.58	10.42	22.01
717.59	4.826	148.69	7.4	1188.0	630.0	1193.0	2.110	78.00	2.39	11.57	10.43	22.00
779.09	5.080	153.36	7.3	1191.0	629.0	1196.0	2.101	77.65	2.39	11.98	10.38	22.35
840.60	4.826	174.18	7.4	1193.0	632.0	1199.0	2.104	77.78	2.39	11.83	10.40	22.22
758.59	4.572	165.92	7.4	1187.0	630.0	1194.0	2.105	77.80	2.39	11.80	10.40	22.20
VALORES PROMEDIO												
783.19	4.877	160.72	7.36	1189.8	630.6	1195.6	2.106	77.84	2.39	11.75	10.40	22.16

Fuente: Propia

Para las briquetas fabricadas con la mezcla en la que se reemplazaron los agregados de la fracción del tamaño correspondiente al Tamiz No. 40, los resultados de los ensayos de Estabilidad y flujo se presentan en la Tabla 4-19 (reemplazo del 4.0%), en la Tabla 4-20 (reemplazo del 5.0%) y en la Tabla 4-21 (reemplazo del 6.0%).

Tabla 4-19. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 40 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 40 – Proporción de Reemplazo = 4.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
1025.12	3.810	269.06	6.9	1196.0	651.0	1203.0	2.167	80.09	2.39	9.20	10.70	19.91
1066.13	3.683	289.47	6.9	1185.0	642.0	1193.0	2.151	79.50	2.39	9.88	10.63	20.50
1025.12	3.810	269.06	6.9	1198.0	653.0	1206.0	2.166	80.08	2.39	9.22	10.70	19.92
1025.12	3.683	278.34	6.9	1194.0	650.0	1202.0	2.163	79.96	2.39	9.36	10.69	20.04
1086.63	3.937	276.00	6.9	1190.0	644.0	1197.0	2.152	79.54	2.39	9.82	10.63	20.46
VALORES PROMEDIO												
1045.63	3.785	276.39	6.9	1192.6	648.0	1200.2	2.160	79.83	2.39	9.50	10.67	20.17

(Fuente: Propia)

Tabla 4-20. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 40 – Proporción de Reemplazo = 5.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 40 – Proporción de Reemplazo = 5.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
1025.12	3.556	288.28	7.00	1194.0	637.0	1199.0	2.125	78.53	2.39	10.97	10.50	21.47
963.62	3.683	261.64	7.10	1196.0	638.0	1203.0	2.117	78.25	2.39	11.29	10.46	21.75
984.12	3.810	258.30	7.00	1187.0	635.0	1193.0	2.127	78.63	2.39	10.86	10.51	21.37
984.12	3.683	267.21	7.00	1189.0	636.0	1195.0	2.127	78.62	2.39	10.87	10.51	21.38
963.62	3.810	252.92	7.00	1192.0	638.0	1199.0	2.125	78.54	2.39	10.96	10.50	21.46
VALORES PROMEDIO												
984.12	3.708	265.67	7.02	1191.6	636.8	1197.8	2.124	78.52	2.39	10.99	10.49	21.48

Fuente: Propia

Tabla 4-21. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 40 – Proporción de Reemplazo = 6.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 40 – Proporción de Reemplazo = 6.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
779.09	4.572	170.41	7.20	1196.0	630.0	1202.0	2.091	77.29	2.39	12.38	10.33	22.71
820.10	4.572	179.37	7.30	1190.0	627.0	1197.0	2.088	77.17	2.39	12.51	10.31	22.83
758.59	4.826	157.19	7.30	1177.0	618.0	1185.0	2.076	76.73	2.39	13.01	10.26	23.27
717.59	4.572	156.95	7.30	1189.0	625.0	1195.0	2.086	77.11	2.39	12.59	10.31	22.89
717.59	4.826	148.69	7.20	1193.0	626.0	1199.0	2.082	76.96	2.39	12.75	10.29	23.04
VALORES PROMEDIO												
758.59	4.674	162.52	7.26	1189.0	625.2	1195.6	2.084	77.05	2.39	12.65	10.30	22.95

(Fuente: Propia)

Para la mezcla en la que se realizó el reemplazo de los agregados en la fracción del Tamiz No. 80, los resultados de los ensayos de Estabilidad y Flujo se

presentan en la Tabla 4-22 (reemplazo de 4.0%), en la Tabla 4-23 (reemplazo de 5.0%) y en la Tabla 4-24 (reemplazo de 6.0%).

Tabla 4-22. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm ³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
1250.65	3.556	351.70	7.00	1185.0	645.0	1195.0	2.155	79.64	2.39	9.71	10.64	20.36
1291.65	3.302	391.17	7.00	1181.0	642.0	1192.0	2.147	79.37	2.39	10.02	10.61	20.63
1332.66	3.302	403.59	7.00	1187.0	644.0	1193.0	2.162	79.92	2.39	9.40	10.68	20.08
1332.66	3.556	374.76	7.00	1183.0	639.0	1190.0	2.147	79.36	2.39	10.03	10.61	20.64
1271.15	3.302	384.96	7.00	1185.0	644.0	1193.0	2.158	79.79	2.39	9.55	10.66	20.21
VALORES PROMEDIO												
1295.76	3.404	381.24	7.00	1184.2	642.8	1192.6	2.154	79.62	2.39	9.74	10.64	20.38

Fuente: Propia

Tabla 4-23. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm ³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
1230.15	3.302	372.55	7.30	1184.0	638.0	1188.0	2.153	79.58	2.39	9.79	10.64	20.42
1291.65	3.302	391.17	7.00	1198.0	645.0	1203.0	2.147	79.36	2.39	10.03	10.61	20.64
1312.16	3.429	382.66	7.10	1188.0	641.0	1192.0	2.156	79.70	2.39	9.65	10.65	20.30
1291.65	3.429	376.69	7.00	1191.0	643.0	1196.0	2.154	79.61	2.39	9.75	10.64	20.39
1250.65	3.302	378.76	7.00	1189.0	644.0	1196.0	2.154	79.62	2.39	9.74	10.64	20.38
VALORES PROMEDIO												
1275.25	3.353	380.37	7.08	1190.0	642.2	1195.0	2.153	79.57	2.39	9.79	10.64	20.43

Fuente: Propia

Tabla 4-24. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 6.0%

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 6.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm ³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
1127.64	3.810	295.97	7.00	1180.0	635.0	1184.0	2.149	79.45	2.39	9.93	10.62	20.55
1045.63	3.937	265.59	7.10	1186.0	638.0	1190.0	2.149	79.42	2.39	9.96	10.62	20.58
1086.63	3.937	276.00	7.00	1190.0	640.0	1195.0	2.144	79.26	2.39	10.15	10.59	20.74
1086.63	4.064	267.38	7.00	1192.0	642.0	1197.0	2.148	79.39	2.39	10.00	10.61	20.61
1086.63	4.064	267.38	7.10	1188.0	639.0	1192.0	2.148	79.41	2.39	9.97	10.61	20.59
VALORES PROMEDIO												
1086.63	3.962	274.46	7.04	1187.2	638.8	1191.6	2.148	79.39	2.39	10.00	10.61	20.61

Fuente: Propia

En la Tabla 4-25 se presentan los resultados del ensayo de Estabilidad y Flujo para la mezcla convencional, a partir de los cuales se realizará la comparación para evaluar si el comportamiento mecánico de las mezclas modificadas mejora o si por el contrario es menor al de la mezcla convencional.

Tabla 4-25. Resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo – Mezcla Convencional (Patrón de Comparación)

Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 6.0%												
Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	Relación E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm ³]	Volumen Agregados [%]	Gmm	Vacíos [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacíos en AP [%]
1107.13	3.937	281.21	6.40	1192.0	650.0	1195.0	2.187	80.85	2.39	8.35	10.81	19.15
1086.63	4.064	267.38	6.50	1189.0	651.0	1192.0	2.198	81.24	2.39	7.90	10.86	18.76
1148.14	4.064	282.51	6.40	1194.0	652.0	1197.0	2.191	80.98	2.39	8.19	10.82	19.02
1127.64	3.937	286.42	6.40	1189.0	651.0	1194.0	2.190	80.94	2.39	8.24	10.82	19.06
1189.14	4.064	292.60	6.50	1195.0	654.0	1198.0	2.197	81.20	2.39	7.95	10.85	18.80
VALORES PROMEDIO												
1131.74	4.013	282.03	6.44	1191.8	651.6	1195.2	2.192	81.04	2.39	8.12	10.83	18.96

Fuente: Propia

Un resumen de los resultados expresado en términos de los valores promedio obtenidos en los ensayos para cada una de las diferentes mezclas sometidas al ensayo de Estabilidad y Flujo se presenta en la Tabla 4-26.

Tabla 4-26. Resumen promedio de resultados en el Ensayo de Estabilidad y Flujo para mezclas con inclusión de Terlenka

Tamiz de Reemplazo	Porcentaje de Reemplazo [%]	Estabilidad [kg]	Flujo [mm]	E/F [kg/mm]	Longitud [cm]	Masa en aire [g]	Masa en agua [g]	PSS [g]	Densidad bulk [g/cm ³]	Vol. Agreg. [%]	Gmm	Vacios [%]	Vol. Asfalto [%]	Vacios en AP [%]
10	4.00	1082.53	3.835	282.22	7.02	1192.8	640.2	1198.4	2.137	78.99	2.39	10.45	10.56	21.01
	5.00	1041.52	3.708	280.97	7.24	1194.4	637.4	1201.8	2.116	78.23	2.39	11.32	10.46	21.77
	6.00	783.19	4.877	160.72	7.36	1189.8	630.6	1195.6	2.106	77.84	2.39	11.75	10.40	22.16
40	4.00	1045.63	3.785	276.39	6.9	1192.6	648.0	1200.2	2.160	79.83	2.39	9.50	10.67	20.17
	5.00	984.12	3.708	265.67	7.02	1191.6	636.8	1197.8	2.124	78.52	2.39	10.99	10.49	21.48
	6.00	758.59	4.674	162.52	7.26	1189.0	625.2	1195.6	2.084	77.05	2.39	12.65	10.30	22.95
80	4.00	1295.76	3.404	381.24	7.00	1184.2	642.8	1192.6	2.154	79.62	2.39	9.74	10.64	20.38
	5.00	1275.25	3.353	380.37	7.08	1190.0	642.2	1195.0	2.153	79.57	2.39	9.79	10.64	20.43
	6.00	1086.63	3.962	274.46	7.04	1187.2	638.8	1191.6	2.148	79.39	2.39	10.00	10.61	20.61

Fuente: Propia

4.4 ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA

Una vez se obtuvieron los resultados de los ensayos de Estabilidad y Flujo de las mezclas con adición de Terlenka, se seleccionaron las mezclas que ofrecieron mejores resultados en comparación con la mezcla asfáltica convencional, las cuales corresponden a las mezclas con reemplazo de 4.0% y 5.0% para la fracción de agregados en el Tamiz No. 80 (Ver Capítulo 5).

Sobre dichas mezclas se realizaron ensayos de tracción indirecta para evaluar la susceptibilidad de las mezclas a la acción del agua, siguiendo los lineamientos consignados en la Norma INV E-725.

Para la mezcla con un reemplazo de 4.0% en la fracción de agregados del Tamiz No. 80, se prepararon 6 briquetas, de acuerdo a lo exigido por la normativa, cuyas características se presentan en la Tabla 4-27.

Tabla 4-27. Características de la Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Briquetas Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%						
Parámetro	Briqueta No.					
	1	2	3	4	5	6
Diámetro (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Altura (mm)	65.3	65.2	65.3	64.5	64.2	64.6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1163.6	1150.2	1150.2	1153.2	1146.1	1147.5
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1166.9	1153.6	1157.1	1158.4	1151.0	1152.4
Masa del espécimen en agua (g)	646.6	637.8	641.2	639.1	634.9	639.7
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	520.3	515.8	515.9	519.3	516.1	512.7
Gravedad específica bulk a 25°C	2.236	2.230	2.230	2.221	2.221	2.238
% de vacíos de aire en la briqueta (%)	7.0	7.2	7.3	7.6	7.6	6.9
Volumen de vacíos en la briqueta (cm ³)	36.3	37.3	37.4	39.6	39.4	35.4

Fuente: Propia

Se observa que el porcentaje de vacíos con aire de las briquetas se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma (6% a 8%).

Los grupos de briquetas establecidos para el ensayo correspondieron a:

- Grupo en condición seca: Briquetas No. 1, 3 y 5. Vacíos con aire 7.3%.
- Grupo en condición saturada: Briquetas No. 2, 4 y 6. Vacíos con aire 7.3%.

El grupo para saturación se sometió al primer proceso de saturación parcial, donde se obtuvieron los resultados que se indican en la Tabla 4-28. Es importante observar que el nivel de saturación promedio fue del 74.7%, dentro de los límites especificados por la normativa para este proceso dentro del ensayo.

Tabla 4-28. Resultados Saturación Parcial de Briquetas de Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Saturación Parcial de Briquetas - Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%			
Parámetro	Briqueta No.		
	2	4	6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1150.2	1153.2	1147.5
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1177.4	1183.7	1173.8
Masa del espécimen en agua (g)	660.6	660.4	660.2
Masa del volumen en agua a 25°C (g)	516	523.3	513.6
Volumen absorbido de agua (cm ³)	27.2	30.5	26.3
Volumen de vacíos en la briqueta (cm ³)	37.3	39.6	35.4
Grado de saturación (%)	72.8	77.0	74.4
Grado de saturación promedio (%)	74.7		
% Hinchamiento (%)	0.2	0.8	0.2
% Hinchamiento promedio (%)	0.4		

Fuente: Propia

En la Tabla 4-29 se presentan los resultados de la segunda etapa de saturación, después de la inmersión durante 24 horas en un baño de agua a 60°C, llegando hasta un nivel de saturación promedio del 98.6% con un hinchamiento promedio del 1.0%.

Tabla 4-29. Resultados Saturación Final de Briquetas de Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Saturación Final de Briquetas - Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%			
Parámetro	Briqueta No.		
	2	4	6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1150.2	1153.2	1147.5
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1187.2	1191.9	1182.5
Masa del espécimen en agua (g)	669.3	664.8	664.5
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	517.9	527.1	518
Volumen absorbido de agua (cm ³)	37	38.7	35.0
Grado de Saturación (%)	99.1	97.7	99.0
Grado de Saturación promedio (%)	98.6		
% Hinchamiento (%)	0.4	1.5	1.0
% Hinchamiento promedio (%)	1.0		

Fuente: Propia

Posteriormente las muestras se sometieron al proceso de carga en sentido diametral, como lo indica la normativa del ensayo, obteniendo los resultados de resistencia a la tensión que se muestran en la Tabla 4-30 para el grupo de briquetas conservadas en seco y en la Tabla 4-31 para el grupo de briquetas sometidas al proceso de saturación.

Tabla 4-30. Resultados de Resistencia a la Tensión – Grupo de Briquetas en Seco – Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Resistencia a la Tensión Grupo de Probetas en Seco - Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%				
Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia a la Tensión (Kpa)
1	65.3	101.6	1014	973.0
3	65.3	101.6	1091	1046.9
5	64.2	101.6	996	972.1
Promedio Resistencia a la Tensión (kPa)				997.3

Fuente: Propia

Tabla 4-31. Resultados de Resistencia a la Tensión – Grupo de Briquetas Saturadas – Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Resistencia a la Tensión Grupo de Probetas Saturadas - Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%				
Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia a la Tensión (Kpa)
2	65.2	101.6	838	805.3
4	64.5	101.6	739	717.9
6	64.6	101.6	816	791.5
Promedio Resistencia a la Tensión (kPa)				771.6

Fuente: Propia

Finalmente se calcula la Relación de Resistencia a Tensión (RRT) a partir de la relación entre la resistencia a la tensión promedio del grupo saturado y la resistencia a la tensión promedio del grupo seco, la cual para el caso tiene un valor del 77.4%, como se indica a continuación:

$$RRT(\%) = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} * 100 = \frac{771.6}{997.3} * 100 = 77.4\%$$

De forma similar, para la mezcla asfáltica con un reemplazo de 5.0% en la fracción de agregados del Tamiz No. 80, se prepararon 6 briquetas con las características que se presentan en la Tabla 4-32, siempre cumpliendo con el requisito de un porcentaje de vacíos con aire entre el 6% y el 8%, de acuerdo con las exigencias de la Norma INV E-725.

Tabla 4-32. Características de la Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%

Briquetas Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%						
Parámetro	Briqueta No.					
	1	2	3	4	5	6
Diámetro (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Altura (mm)	65.3	65.7	65.0	65.7	65	64.6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1142.1	1143.6	1151	1154.4	1148.7	1146.2
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1144.8	1147.7	1155	1159.6	1153.5	1152.6
Masa del espécimen en agua (g)	630.0	631.8	639.2	639.0	638.3	636.9
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	514.8	515.9	515.8	520.6	515.2	515.7
Gravedad específica bulk a 25°C	2.219	2.217	2.231	2.217	2.23	2.223
% de vacíos de aire en la briqueta (%)	7.6	7.7	7.1	7.6	7.1	7.4
Volumen de vacíos en la briqueta (cm ³)	39.1	39.6	36.4	39.8	36.8	38.3

Fuente: Propia

Las briquetas se dividieron en dos grupos, de acuerdo con la condición a la cual se someterían, de tal forma que se agruparon como se indica a continuación:

- Grupo en condición seca: Briquetas No. 1, 3 y 4. Vacíos con aire 7.4%.
- Grupo en condición saturada: Briquetas No. 2, 5 y 6. Vacíos con aire 7.4%.

El grupo de briquetas para saturación se sometió al primer proceso de saturación parcial, obteniendo un nivel de saturación promedio del 78.1%, dentro de los límites dados por la normativa, con un hinchamiento promedio del 0.3%. Los resultados obtenidos en esta etapa del ensayo se presentan en la Tabla 4-33.

Tabla 4-33. Resultados Saturación Parcial de Briquetas de Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%

Saturación Parcial de Briquetas - Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%			
Parámetro	Briqueta No.		
	2	5	6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1143.6	1148.7	1146.2
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1176	1177.1	1175
Masa del espécimen en agua (g)	659.6	658.8	658.1
Masa del volumen en agua a 25°C (g)	516.4	518.3	516.9
Volumen absorbido de agua (cm ³)	32.4	28.4	28.8
Volumen de vacíos en la briqueta (cm ³)	39.6	36.8	38.3
Grado de saturación (%)	81.8	77.2	75.2
Grado de saturación promedio (%)	78.1		
% Hinchamiento (%)	0.1	0.6	0.2
% Hinchamiento promedio (%)	0.3		

Fuente: Propia

Los resultados de la segunda etapa de saturación, después de la inmersión durante 24 horas en un baño de agua a 60°C se presentan en la Tabla 4-34. El nivel de saturación final promedio fue del 98.5% con un hinchamiento promedio del 0.8%.

Tabla 4-34. Resultados Saturación Final de Briquetas de Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%

Saturación Final de Briquetas - Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%			
Parámetro	Briqueta No.		
	2	5	6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1143.6	1148.7	1146.2
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1182.8	1185.4	1183.2
Masa del espécimen en agua (g)	664.0	664.9	663.5
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	518.8	520.5	519.7
Volumen absorbido de agua (cm ³)	39.2	36.7	37.0
Grado de Saturación (%)	99.0	99.8	96.6
Grado de Saturación promedio (%)	98.5		
% Hinchamiento (%)	0.6	1.0	0.8
% Hinchamiento promedio (%)	0.8		

Fuente: Propia

Finalmente las briquetas se llevaron a la falla con la aplicación de la carga en sentido diametral. Los resultados de resistencia a la tensión se muestran en la Tabla 4-35 para el grupo de briquetas conservadas en seco y en la Tabla 4-36 para el grupo de briquetas sometidas al proceso de saturación.

Tabla 4-35. Resultados de Resistencia a la Tensión – Grupo de Briquetas en Seco – Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%

Resistencia a la Tensión Grupo de Probetas en Seco - Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%				
Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia a la Tensión (Kpa)
1	65.3	101.6	1053	1010.4
3	65.0	101.6	1055	1017.0
4	65.7	101.6	1023	975.7
Promedio Resistencia a la Tensión (kPa)				1001.0

Fuente: Propia

Tabla 4-36. Resultados de Resistencia a la Tensión – Grupo de Briquetas Saturadas – Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%

Resistencia a la Tensión Grupo de Probetas Saturadas - Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 5.0%				
Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia a la Tensión (Kpa)
2	65.7	101.6	866	825.9
5	65.0	101.6	621	791.4
6	64.6	101.6	799	775.0
Promedio Resistencia a la Tensión (kPa)				797.5

Fuente: Propia

La Relación de Resistencia a Tensión (RRT) se calcula a partir de la relación entre la resistencia a la tensión promedio del grupo saturado y la resistencia a la tensión promedio del grupo seco, la cual para el caso tiene un valor del 79.7%, como se indica a continuación:

$$RRT(\%) = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} * 100 = \frac{797.5}{1001.0} * 100 = 79.7\%$$

Con el fin de realizar la comparación del comportamiento mecánico de las mezclas con adición de Terlenka, también se llevó a cabo el ensayo de tracción indirecta para evaluación de susceptibilidad al agua, sobre la mezcla patrón (convencional). Las probetas fabricadas tienen las características indicadas en la Tabla 4-37.

Tabla 4-37. Características de la Mezcla Convencional

Briquetas Mezcla Convencional						
Parámetro	Briqueta No.					
	1	2	3	4	5	6
Diámetro (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Altura (mm)	63.2	65.9	66.0	65.5	64.8	64.2
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1139.2	1162.2	1151.8	1150.7	1145.3	1150.8
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1144.7	1167.4	1156.9	1155.1	1149.4	1156.4
Masa del espécimen en agua (g)	638.3	549.4	642.7	642.9	637.2	642
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	506.4	518.0	514.2	512.2	512.2	514.4
Gravedad específica bulk a 25°C	2.25	2.244	2.24	2.247	2.236	2.237
% de vacíos de aire en la briqueta (%)	7.1	7.3	7.5	7.2	7.6	7.6
Volumen de vacíos en la briqueta (cm ²)	35.9	38.0	38.4	36.9	39.1	39.1

Fuente: Propia

La distribución de las briquetas se realizó como se indica a continuación:

- Grupo en condición seca: Briquetas No. 1, 3 y 5. Vacíos con aire 7.4%.
- Grupo en condición saturada: Briquetas No. 2, 4 y 6. Vacíos con aire 7.4%.

En la Tabla 4-38 se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de saturación parcial. El nivel de saturación promedio obtenido fue del 74.3% con un hinchamiento promedio del 0.4%.

Tabla 4-38. Resultados Saturación Parcial de Briquetas de Mezcla Convencional

Saturación Parcial de Briquetas – Mezcla Convencional			
Parámetro	Briqueta No.		
	2	4	6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1162.2	1150.7	1150.8
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1191.2	1177.6	1179.6
Masa del espécimen en agua (g)	670.1	665.0	663.2
Masa del volumen en agua a 25°C (g)	521.1	512.6	516.4
Volumen absorbido de agua (cm ³)	29	26.9	28.8
Volumen de vacíos en la briqueta (cm ³)	38.0	36.9	39.1
Grado de saturación (%)	76.4	72.9	73.7
Grado de saturación promedio (%)	74.3		
% Hinchamiento (%)	0.6	0.1	0.4
% Hinchamiento promedio (%)	0.4		

Fuente: Propia

Los resultados de la segunda etapa de saturación, después de la inmersión durante 24 horas en un baño de agua a 60°C se presentan en la Tabla 4-39. El nivel de saturación final promedio fue del 98.5% con un hinchamiento promedio del 0.8%.

Tabla 4-39. Resultados Saturación Final de Briquetas de Mezcla Convencional

Saturación Final de Briquetas – Mezcla Convencional			
Parámetro	Briqueta No.		
	2	4	6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1162.2	1150.7	1150.8
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1199.9	1187	1189
Masa del espécimen en agua (g)	677.6	671.5	670.1
Masa del volumen de agua a 25°C (g)	522.3	515.5	518.9
Volumen absorbido de agua (cm ³)	37.7	36.3	38.2
Grado de Saturación (%)	99.3	98.4	97.8
Grado de Saturación promedio (%)	98.5		
% Hinchamiento (%)	0.8	0.6	0.9
% Hinchamiento promedio (%)	0.8		

Fuente: Propia

En la Tabla 4-40 se muestran los resultados de la resistencia a la tensión para las muestras conservadas en condición seca y en la Tabla 4-41 se presentan los

resultados de la resistencia a la tensión de las muestras sometidas al proceso de saturación.

Tabla 4-40. Resultados de Resistencia a la Tensión – Grupo de Briquetas en Seco – Mezcla Convencional

Resistencia a la Tensión Grupo de Probetas en Seco – Mezcla Convencional				
Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia a la Tensión (Kpa)
1	63.2	101.6	1027	1018.2
3	66.0	101.6	1021	969.3
5	64.8	101.6	1072	1036.6
Promedio Resistencia a la Tensión (kPa)				1008.0

Fuente: Propia

Tabla 4-41. Resultados de Resistencia a la Tensión – Grupo de Briquetas Saturadas – Mezcla Convencional

Resistencia a la Tensión Grupo de Probetas Saturadas – Mezcla Convencional				
Probeta No.	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Estabilidad (Kg)	Resistencia a la Tensión (Kpa)
2	65.9	101.6	806	766.4
4	65.5	101.6	826	790.2
6	64.2	101.6	883	861.8
Promedio Resistencia a la Tensión (kPa)				806.1

Fuente: Propia

La Relación de Resistencia a Tensión (RRT) se calcula a partir de la relación entre la resistencia a la tensión promedio del grupo saturado y la resistencia a la tensión promedio del grupo seco, la cual para el caso tiene un valor del 79.7%, como se indica a continuación:

$$RRT(\%) = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} * 100 = \frac{806.1}{1008.0} * 100 = 80.0\%$$

4.5 ENSAYOS DE INMERSIÓN – COMPRESIÓN

El ensayo de Inmersión – Compresión se realizó sobre un tipo de mezcla, seleccionada de acuerdo con los resultados del ensayo de Estabilidad y Flujo,

teniendo en cuenta aquella con la cual se obtuvo el mayor valor de Estabilidad, la cual correspondió a la mezcla con reemplazo de Terlenka en un 4.0% para la fracción del Tamiz 80.

En la Tabla 4-42 se presentan las características de las seis probetas fabricadas para la prueba de acuerdo con los requerimientos de la norma INV E-738.

Tabla 4-42. Características de la Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Briquetas Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%						
Parámetro	Briqueta No.					
	1	2	3	4	5	6
Altura(mm)	102.3	101.6	101.5	101.8	101.9	102.4
Diametro (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1839.8	1843.6	1848.7	1841.5	1846.3	1849.9
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1844.8	1849.5	1857.0	1850.4	1851.2	1854.9
Masa del espécimen en agua (g)	1022.8	1022.6	1027.5	1025.1	1026.6	1025.9
Masa del volumen de agua a 25° C (g)	822.0	826.9	829.5	825.3	824.6	829.0
Gravedad específica bulk a 25° C	2.238	2.23	2.229	2.231	2.239	2.231
Gmm	2.404	2.404	2.404	2.404	2.404	2.404
% Vacíos	6.9	7.3	7.3	7.2	6.9	7.2

Fuente: Propia

Las probetas se distribuyeron en dos grupos de acuerdo con las condiciones a las cuales se sometieron, como se indica a continuación:

- Grupo 1 Mezcla en condición seca: Briquetas No. 1, 3 y 6.
- Grupo 2 Mezcla acondicionada en agua: Briquetas No. 2, 4 y 5.

Los resultados de resistencia a la compresión simple para cada uno de los grupos se presentan en la Tabla 4-43.

Tabla 4-43. Resultados Resistencia a la Compresión Simple - Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%

Resistencia a la Compresión Simple - Mezcla con Reemplazo de Fracción Granulométrica Tamiz No. 80 – Proporción de Reemplazo = 4.0%			
Grupo 1 - Mezcla en condición Seca			
Briqueta No.	1	3	6
Resistencia a Compresión Simple (kPa)	3895	3799	4001
Promedio de Resistencia a la Compresión Simple (kPa)	3899		
Grupo 2 - Mezcla acondicionada en agua			
Briqueta No.	2	4	5
Resistencia a Compresión Simple (kPa)	3404	3106	3481
Promedio de Resistencia a la Compresión Simple (kPa)	3330		

Fuente: Propia

A partir de los valores promedio de resistencia obtenidos para cada grupo de probetas analizadas, se realizó el cálculo de la Resistencia Conservada, la cual tiene un valor de 85.4% como se indica a continuación

$$\text{Resistencia Conservada (\%)} = \frac{R_1}{R_2} * 100 = \frac{3330}{3899} * 100 = 85.4\%$$

El ensayo también se realizó sobre la mezcla asfáltica convencional con el fin de establecer valores de comparación, de tal forma que en la se presentan las características de las briquetas producidas para el ensayo.

Tabla 4-44. Características de la Mezcla Convencional

Briquetas Mezcla Convencional						
Parámetro	Briqueta No.					
	1	2	3	4	5	6
Altura(mm)	101.7	102.2	102.7	100.9	101.5	101.8
Diametro (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Masa seca del espécimen en el aire (g)	1844.9	1847.7	1861.8	1840.2	1849.6	1853.2
Masa al aire del espécimen saturado y superficie seca (g)	1847.3	1852.1	1870.5	1847.6	1855.4	1859.6
Masa del espécimen en agua (g)	1029.7	1032.2	1044.6	1030.6	1033.5	1036.6
Masa del volumen de agua a 25° C (g)	817.6	819.9	825.9	817.0	821.9	823.0

Briquetas Mezcla Convencional						
Parámetro	Briqueta No.					
	1	2	3	4	5	6
Gravedad específica bulk a 25° C	2.256	2.254	2.254	2.252	2.25	2.252
Gmm	2.421	2.421	2.421	2.421	2.421	2.421
% Vacíos	6.8	6.9	6.9	7.0	7.0	7.0

Fuente: Propia

Las probetas se distribuyeron en los grupos que se indica a continuación para ser sometidas a condiciones secas o húmedas:

- Grupo 1 Mezcla en condición seca: Briquetas No. 2, 3 y 6.
- Grupo 2 Mezcla acondicionada en agua: Briquetas No. 1, 4 y 5.

Los resultados de resistencia a la compresión simple para cada uno de los grupos se presentan en la Tabla 4-43.

Tabla 4-45. Resultados Resistencia a la Compresión Simple - Mezcla Convencional

Resistencia a la Compresión Simple - Mezcla Convencional			
Grupo 1 - Mezcla en condición Seca			
Briqueta No.	2	3	6
Resistencia a Compresión Simple (kPa)	4421	4241	4184
Promedio de Resistencia a la Compresión Simple (kPa)	4282		
Grupo 2 - Mezcla acondicionada en agua			
Briqueta No.	1	4	5
Resistencia a Compresión Simple (kPa)	3528	3283	3483
Promedio de Resistencia a la Compresión Simple (kPa)	3431		

Fuente: Propia

El valor de la Resistencia Conservada para la mezcla convencional es de 80.1% establecido como se indica a continuación:

$$Resistencia\ Conservada\ (\%) = \frac{R_1}{R_2} * 100 = \frac{3431}{4282} * 100 = 80.1\%$$

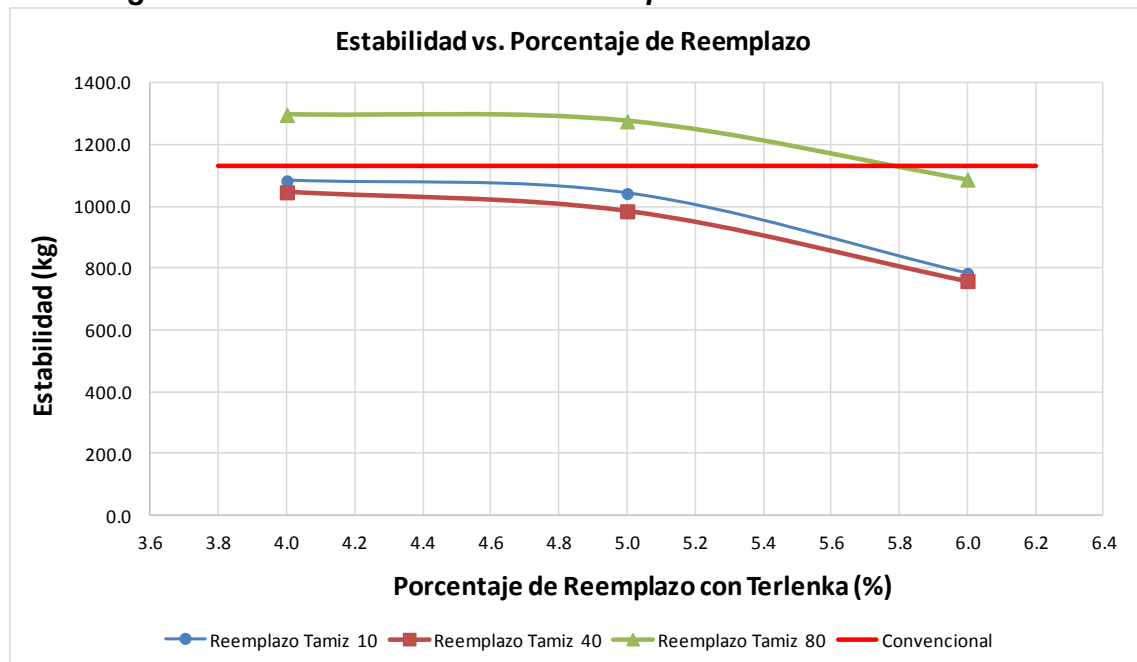
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se consolidó la información obtenida en los ensayos de laboratorio de acuerdo con lo definido en el plan de ensayos descrito en el Capítulo 4. En el presente capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos para establecer el comportamiento mecánico de las mezclas con inclusión de Terlenka.

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ESTABILIDAD Y FLUJO

En la Figura 5-1 se presenta el comportamiento de la Estabilidad para los diferentes tipos de mezclas modificadas y analizadas, incluyendo los valores obtenidos para la muestra convencional, la cual se toma como base comparativa.

Figura 5-1. Variación de la Estabilidad para las mezclas analizadas.



Fuente: Propia

En primer lugar se debe señalar que las mezclas con inclusiones de terlenka presentan un comportamiento similar ya que el valor de la Estabilidad se reduce

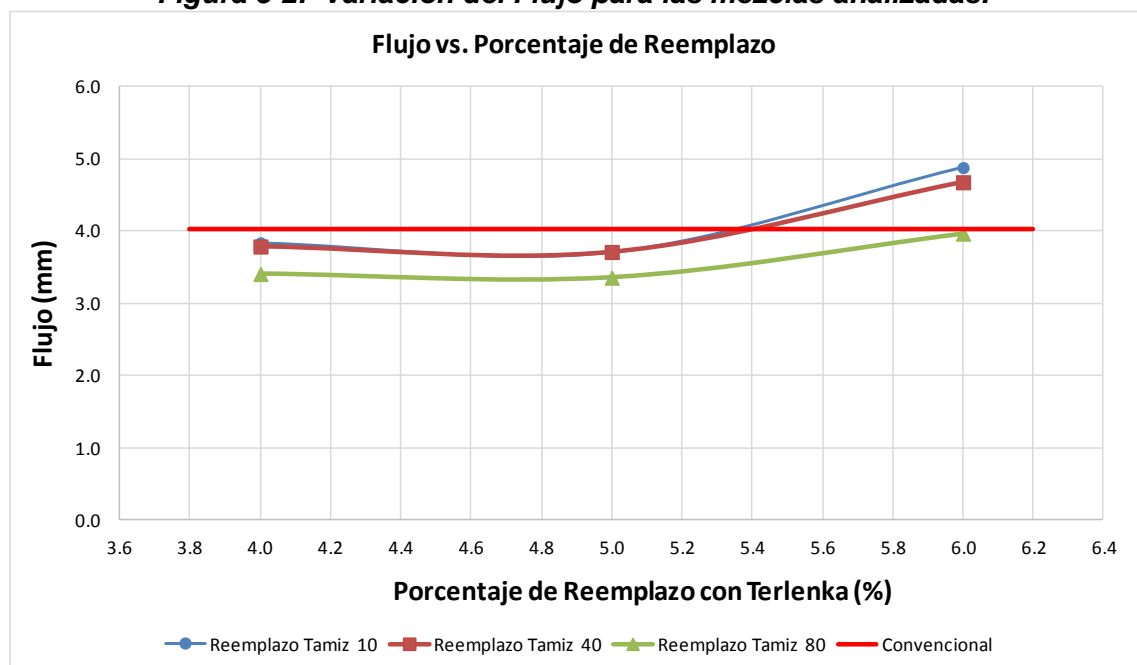
con el aumento en el porcentaje de reemplazo. Sin embargo, se destaca que las mezclas en las que se realizó un reemplazo de agregados en las franjas del Tamiz No. 10 y del Tamiz No. 40 presentan valores de Estabilidad menores que los obtenidos para la mezcla asfáltica convencional, mostrando además que para un porcentaje de reemplazo del 6.0%, los valores se alejan con respecto al valor de comparación.

Para el caso de la mezcla con reemplazo de agregados en el Tamiz No. 80, los valores son mejores que la mezcla convencional para porcentajes de reemplazo del 4.0% y 5.0%, en tanto que para el reemplazo del 6.0%, el valor de estabilidad es ligeramente menor que el obtenido para la mezcla convencional.

Lo anterior se traduce en que las mezclas con reemplazo en los Tamices No. 10 y No. 40 tienen menores capacidades de resistencia a carga que la mezcla asfáltica convencional, lo cual contrasta con la mezcla que tiene reemplazo de agregados en el Tamiz No. 80, donde se evidencia una mayor resistencia a cargas que la mezcla patrón.

El comportamiento de las mezclas en términos de Flujo se puede observar en la Figura 5-2, incluyendo la muestra patrón (mezcla convencional).

Figura 5-2. Variación del Flujo para las mezclas analizadas.



Fuente: Propia

Los valores de flujo obtenidos para las mezclas con reemplazo en el Tamiz No. 10 y en el Tamiz No. 40 son muy similares, aumentando conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de agregados por terlenka. Para estos dos tipos de mezcla, los valores de flujo para los porcentajes de reemplazo de 4.0% y 5.0% son menores que los obtenidos para la mezcla patrón, lo cual indica un comportamiento favorable ante las deformaciones.

Para el caso de la mezcla con reemplazo en la franja del Tamiz No. 80, los valores de flujo son aún más bajos que los obtenidos para los otros dos tipos de mezclas modificadas, con una tendencia similar en términos de que el flujo aumenta con el incremento del porcentaje de reemplazo, aunque en este caso, siempre se mantiene por debajo de los valores obtenidos para la mezcla convencional.

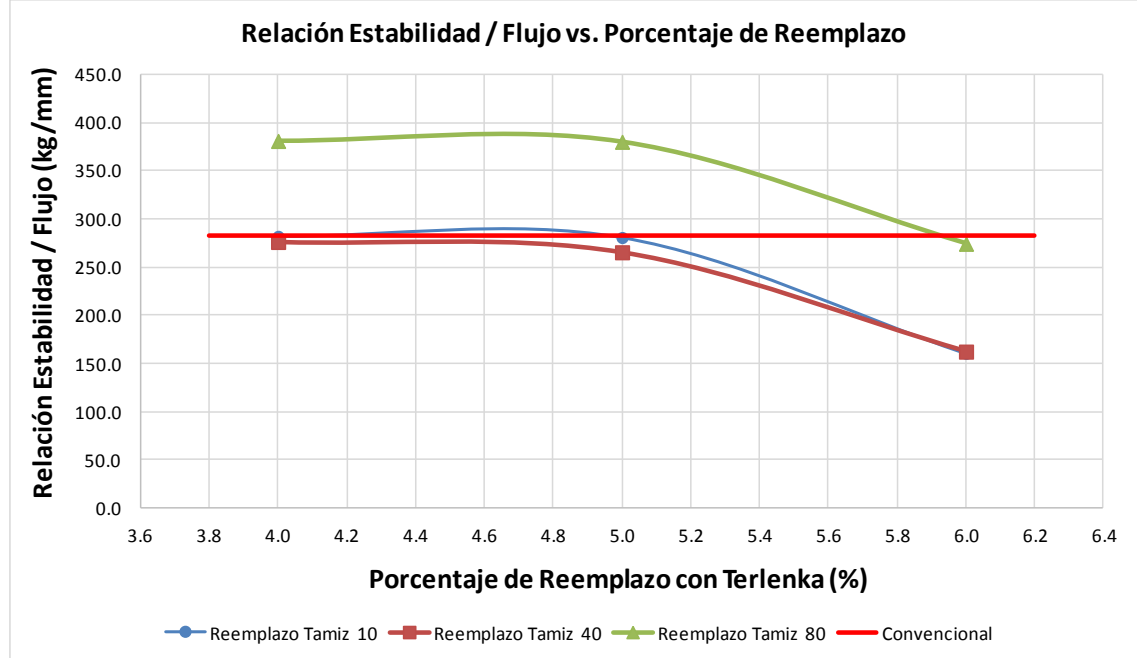
Por lo anterior se establece que las mezclas asfálticas que tienen un reemplazo de agregados entre el 4.0% y el 5.0% por terlenka tiene un comportamiento favorable en término de deformaciones con respecto a la mezcla convencional. La mezcla con mejor comportamiento es aquella en la que se reemplazan agregados en la franja del Tamiz No. 80.

El comportamiento mecánico de las mezclas también debe ser evaluado a la luz de la relación entre la Estabilidad y el Flujo, cuya variación se puede observar en la Figura 5-3 .

Observando los valores de la relación Estabilidad / Flujo se establece que la mezcla con reemplazo en el Tamiz No. 40 presenta valores menores a los de la mezcla convencional en cualquiera de los porcentajes de reemplazo, aunque con una mayor diferencia en la mezcla con reemplazo del 6.0%.

Para la mezcla con reemplazo en el Tamiz No. 10, los valores de la relación Estabilidad / Flujo son similares a los de la mezcla convencional para porcentajes de terlenka del 4.0% y el 5.0%. Para el porcentaje de terlenka del 6.0%, la relación es notablemente menor con respecto a la mezcla patrón.

Figura 5-3. Variación de la relación Estabilidad / Flujo para las mezclas analizadas.



Fuente: Propia

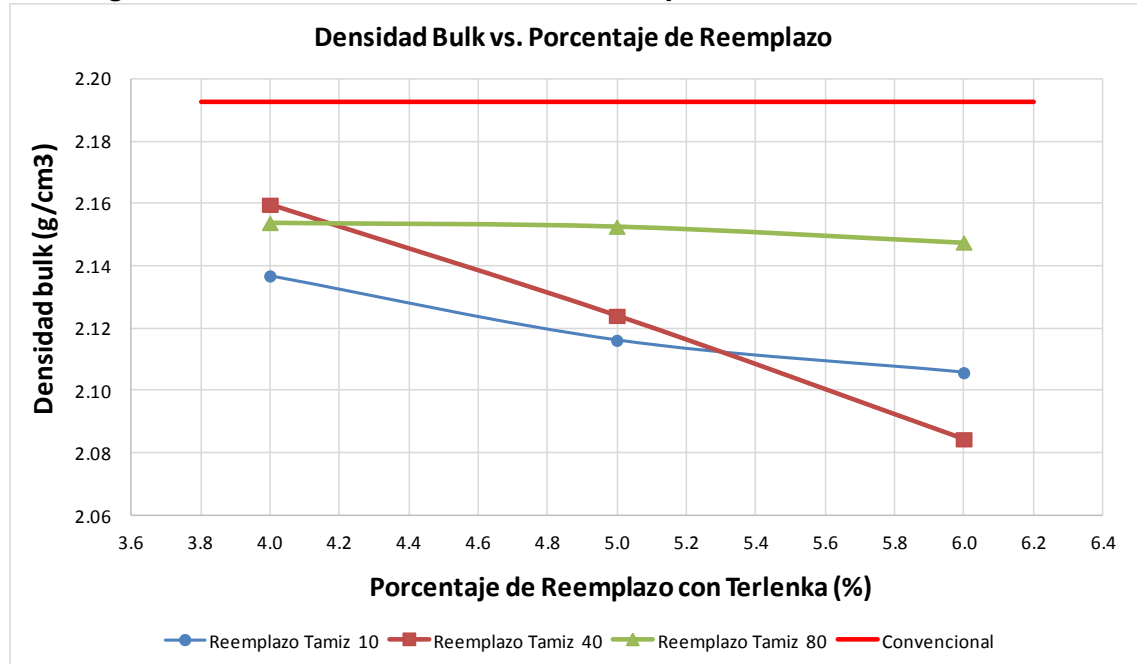
En el caso de la mezcla en la cual se reemplazó material de la fracción del Tamiz 80, los valores de la relación Estabilidad / Flujo son más altos que los de la mezcla patrón, tendiendo a disminuir en el porcentaje del 6.0% de inclusión de terlenka.

A partir de lo anterior se puede establecer que un mejor comportamiento mecánico con respecto a una mezcla convencional, lo ofrece únicamente la mezcla en la cual se reemplazan agregados en el Tamiz No. 80, con porcentajes del 4.0% y del 5.0%. Esto debido a que dichas mezclas ofrecen una mayor resistencia ante las cargas involucrando menores deformaciones, en comparación al comportamiento de la mezcla patrón (convencional).

Las otras mezclas, que pueden tener menores deformaciones, resisten menores valores de carga, lo cual de ninguna manera es una mejora en el comportamiento mecánico. Por lo tanto no se tienen en cuenta para la siguiente fase de análisis, que implica el ensayo de tracción indirecta.

Un aspecto adicional que resulta interesante para el estudio es el comportamiento de la densidad bulk de las mezclas con adiciones de terlenka, el cual se observa en la Figura 5-4.

Figura 5-4. Variación de la densidad bulk para las mezclas analizadas.



Fuente: Propia

Se puede observar que las mezclas con adición de terlenka tienen densidades menores a las de la mezcla convencional, como es de esperarse dado que la terlenka tiene una densidad sensiblemente menor comparada con la de los agregados. Las variaciones en la densidad bulk oscilan entre el 1.5% y el 5.0%, aunque para la mezcla con reemplazo en el tamiz 80 la diferencia es entre 1.5% y 2.5%, que si bien es una reducción, no se considera que tenga un impacto significativo. Esto quiere decir, en términos prácticos, que no hay una ventaja por aligeramiento de la mezcla.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA

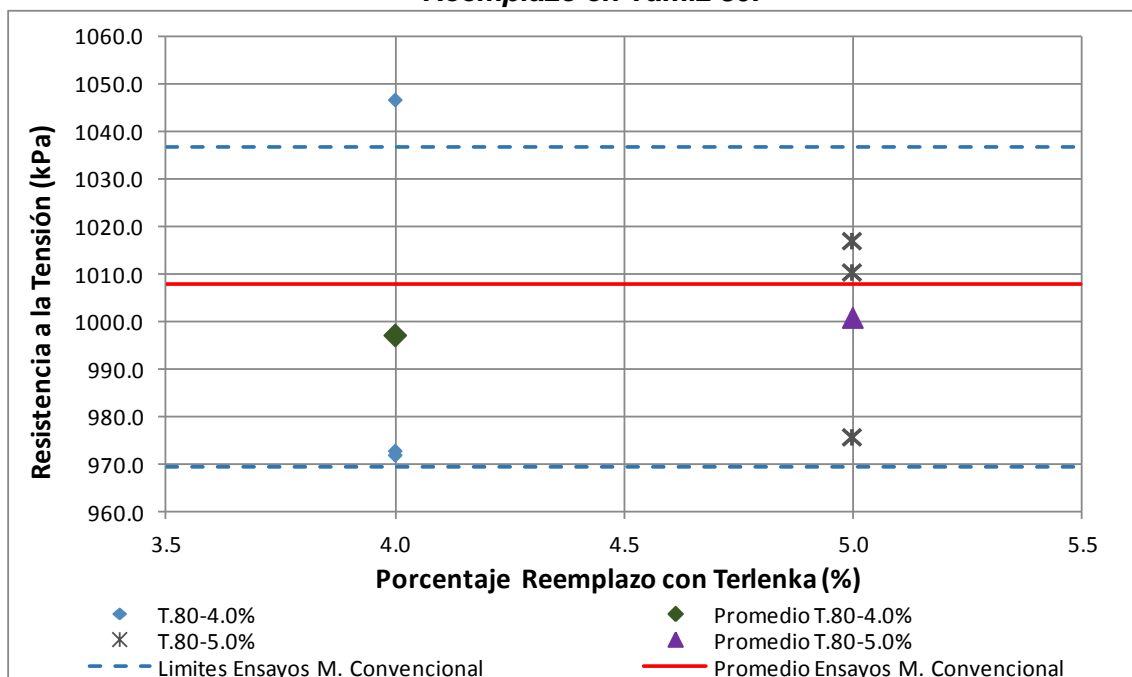
Una vez identificadas la mezclas con reemplazo de Terlenka que presentaron mejores comportamientos en términos de Estabilidad y Flujo, que corresponden a las mezclas que reemplazan la fracción de agregados en el tamiz 80 con porcentajes de 4.0% y 5.0%, éstas se sometieron a ensayos de tensión indirecta para evaluar la susceptibilidad al agua.

Los resultados de resistencia a la tensión para las muestras que permanecieron en condición seca se presentan en la Figura 5-5, donde se puede observar que la mezcla con reemplazo del 4.0% presenta valores más bajos que los del promedio

obtenido para la mezcla convencional, excepto en un caso. Para la mezcla con reemplazo de terlenka en 5.0%, los resultados son mejores y se ubican sobre el promedio obtenido para la mezcla asfáltica convencional, excepto en un caso.

En términos de valores promedio de resistencia a la tensión, los valores obtenidos para las mezclas con adición de Terlenka son menores al promedio establecido para la mezcla convencional, aunque se pueden considerar muy similares dado que las diferencias son menores al 1.0% y los resultados de los ensayos de las mezclas modificadas se encuentran dentro del rango de resultados obtenidos para la mezcla patrón.

Figura 5-5. Variación de la resistencia a la tensión – Probetas en condición seca – Reemplazo en Tamiz 80.



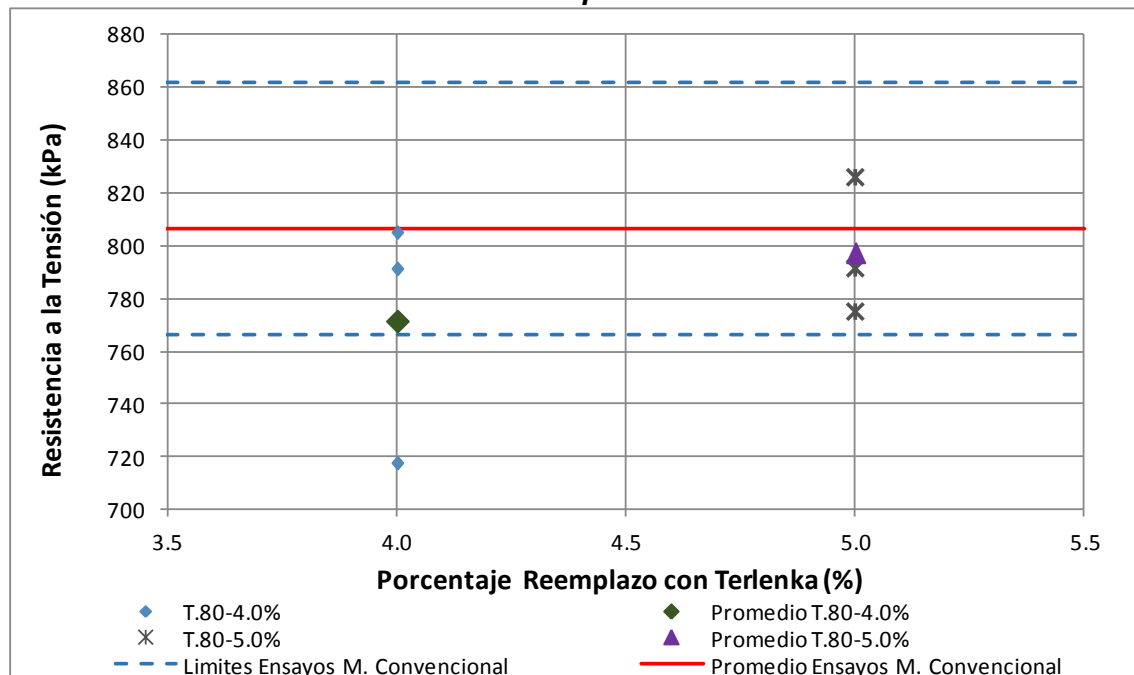
Fuente: Propia

En términos de resistencia a la tensión de las probetas sometidas a saturación, la variación de los resultados se presenta en la Figura 5-6. En este caso se presentan ligeras diferencias en cuanto al comportamiento de la mezclas con adición de Terlenka: los valores obtenidos para las probetas con mezcla con 4.0% de Terlenka, saturadas, son inferiores siempre al promedio obtenido para la mezcla convencional y se destaca uno de los valores, que tiene una diferencia notable con respecto a los demás.

Los valores de resistencia para la mezcla con 5.0% de Terlenka también son menores al promedio de la resistencia de la mezcla convencional saturada, excepto en un caso donde se obtuvo una resistencia ligeramente mayor. Sin embargo, para este tipo de mezcla, los resultados son muy similares a los obtenidos para la mezcla convencional.

En términos de la resistencia promedio, el mejor comportamiento fue obtenido por la mezcla con 5.0% de Terlenka, con un valor de resistencia que difiere en tan solo 1% con respecto a la resistencia de la mezcla patrón. Por su parte, la diferencia de resistencia para la mezcla con 4.0% de Terlenka con respecto a la mezcla patrón alcanza el 4.5%, lo cual quiere decir que dicha mezcla tiene una mayor susceptibilidad ante la exposición al agua.

Figura 5-6. Variación de la resistencia a la tensión – Probetas en condición saturada – Reemplazo en Tamiz 80.

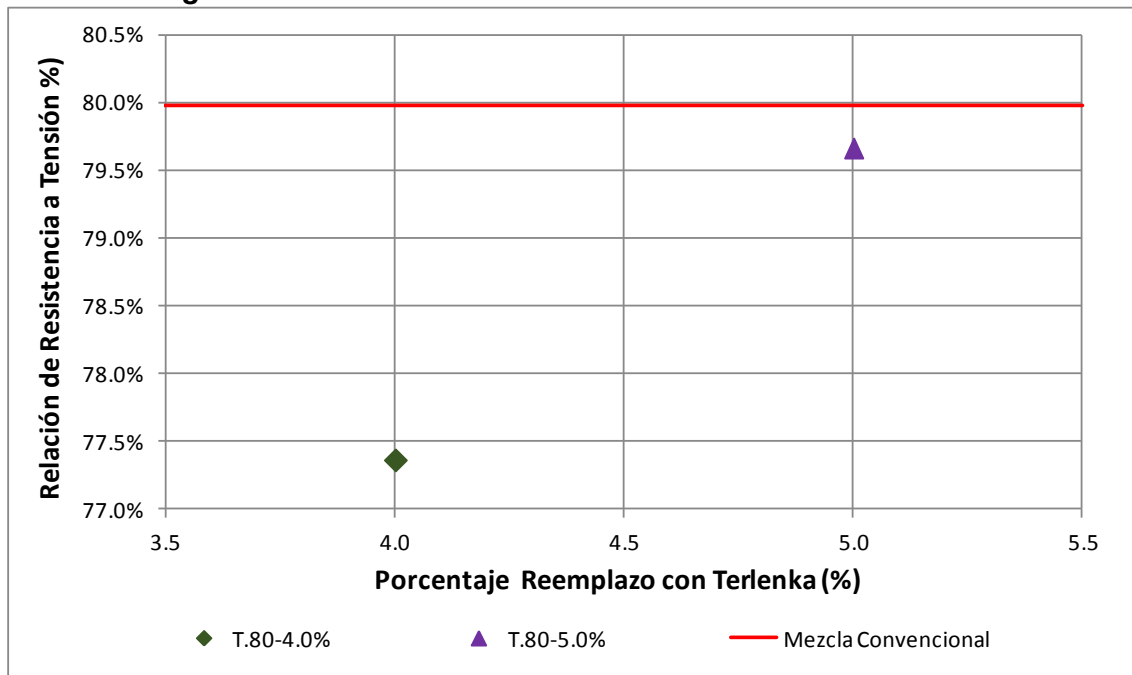


Fuente: Propia

Finalmente, evaluando el valor de la Relación de Resistencia a Tensión (RRT) obtenido para cada uno de los tipos de mezcla analizados en esta fase de la investigación, se tiene que ninguna de las dos mezclas que tienen Terlenka incorporada ofrece mejor comportamiento que la mezcla convencional, como se observa en la Figura 5-7.

Sin embargo, cabe destacar que la mezcla con reemplazo de terlenka en un 5.0% tiene una Relación de Resistencia a la Tensión de 79.7%, en tanto que la mezcla convencional tiene un valor de Relación de Resistencia a la Tensión de 80.0%, de tal forma que puede considerarse que las dos mezclas presentan una susceptibilidad similar ante la exposición al agua. Por su parte, la mezcla con 4.0% de terlenka tiene una susceptibilidad mayor, que se traduce en un valor de Relación de Resistencia a la Tensión de 77.4%,

Figura 5-7. Variación de la Relación de Resistencia a Tensión.



Fuente: Propia

Los comportamientos identificados permiten concluir que la adición de Terlenka no tiene un efecto positivo para las mezclas asfálticas, en términos de susceptibilidad al agua. Por el contrario, los resultados obtenidos presentan una tendencia hacia efectos ligeramente desfavorables.

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN

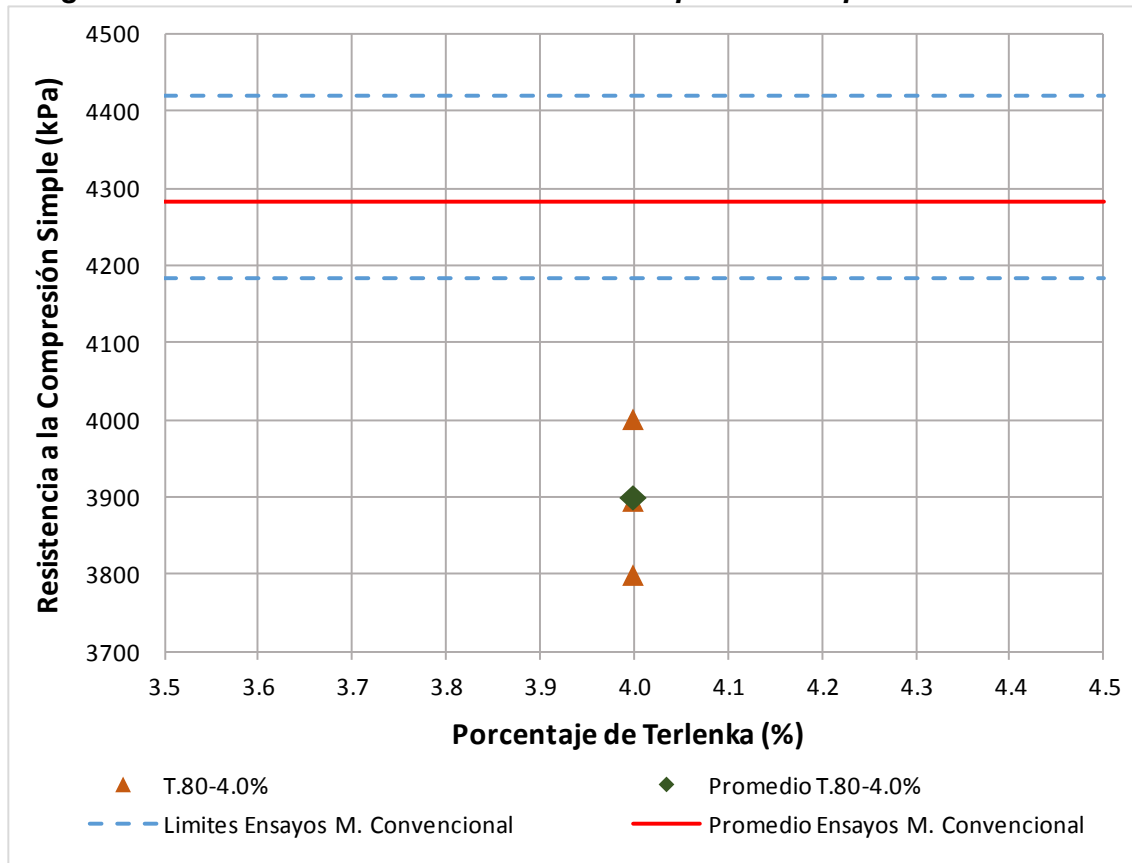
Como se indicó anteriormente, el ensayo de inmersión - compresión se llevó a cabo solo en una de las mezclas modificadas (reemplazo del 4.0% en fracción del tamiz 80) y en la mezcla asfáltica convencional para la base de comparación.

El análisis de los resultados de los ensayos de inmersión – compresión realizados aborda tres aspectos que se consideran fundamentales:

1. Variación de la resistencia a la compresión simple de las probetas sometidas a una condición seca.
2. Variación de la resistencia a la compresión simple de las muestras acondicionadas en agua.
3. Valor de la Resistencia Conservada.

En el primer caso, la Figura 5-8 muestra la variación de la resistencia a la compresión simple de las muestras que se mantuvieron en condiciones secas para la mezcla con adición de Terlenka y para la mezcla convencional que sirve como base de comparación.

Figura 5-8. Variación de la Resistencia a Compresión Simple – Condición Seca.

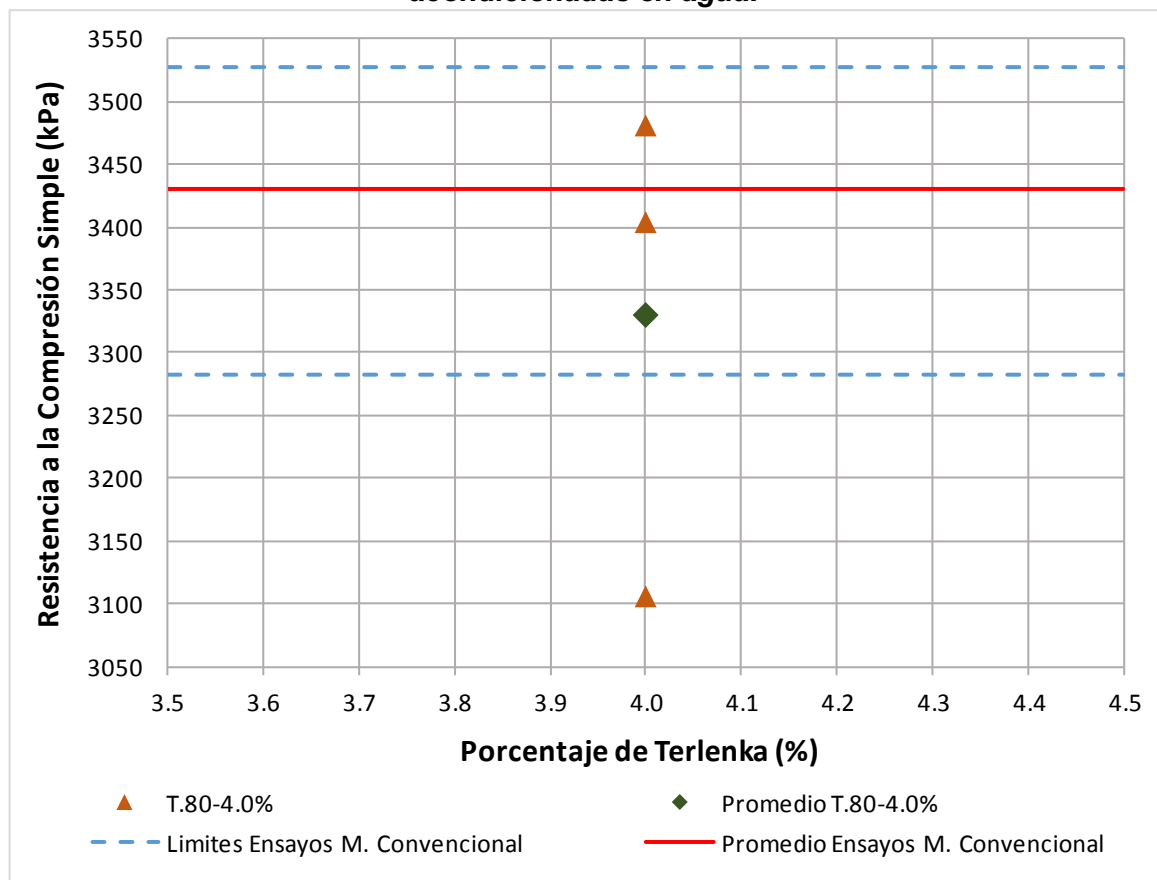


Fuente: Propia

Se observa que los valores de resistencia a la compresión simple de la mezcla modificada son inferiores a los obtenidos para la mezcla convencional. La diferencia es notable y en términos de los valores promedio se tiene que la resistencia de la mezcla modificada es menor en un 9.0% con respecto a la mezcla convencional, lo cual es un comportamiento desfavorable ya que la resistencia a la compresión simple es un indicador directo del grado de resistencia que ofrece una mezcla asfáltica.

Para el caso de la resistencia a la compresión simple de las muestras acondicionadas con agua, los resultados indican que la mezcla asfáltica modificada ofrece valores ligeramente menores que los obtenidos para la mezcla convencional. La diferencia de los valores promedio de resistencia a la compresión simple es del 3% entre las dos mezclas. Los resultados se pueden observar en la Figura 5-9.

Figura 5-9. Variación de la Resistencia a Compresión Simple – Probetas acondicionadas en agua.



Fuente: Propia

Finalmente, los valores de resistencia conservada corresponden al 85% para la mezcla modificada y al 80% para la mezcla convencional. Este resultado permite inferir que la mezcla con la adición de terlenka es menos susceptible a la pérdida de resistencia que puede presentarse por efecto del agua. Sin embargo, en términos de resistencia a la compresión simple de la mezcla modificada, como se describió anteriormente, se tienen comportamientos desfavorables.

En todo caso, se debe destacar que los valores de resistencia a la compresión simple tanto de la mezcla con Terlenka como de la mezcla convencional se pueden considerar altos y apropiados para soportar cargas de tránsito pesado, de acuerdo con lo indicado en el numeral 2.2 de la Norma INV E-747.

6 CONCLUSIONES

La mezcla asfáltica convencional, base para las modificaciones y patrón de comparación, se diseñó con el uso de la metodología Marshall, de tal forma que se logró establecer el contenido óptimo de asfalto, que corresponde a un 5.0%.

A partir de la mezcla convencional se fabricaron las mezclas asfálticas con adición de Terlenka reemplazando una fracción de los agregados en los tamices No.10, No. 40 o No. 80, en proporciones de reemplazo del 4.0%, 5.0% y 6.0%, de tal forma que se evaluaron 9 mezclas modificadas.

Después de realizar el análisis de los resultados individuales de los diferentes ensayos propuestos dentro del alcance de la investigación para las mezclas modificadas, se procede a dar una mirada general e integral de los hallazgos y las conclusiones que de ellos se derivan:

1. En primer lugar se debe señalar que la evaluación del comportamiento mecánico, en términos de Estabilidad y Flujo, de las mezclas modificadas con el reemplazo de una fracción de agregados por Terlenka, permitió descartar mejoras en el comportamiento de las mezclas cuando los agregados de las fracciones del Tamiz 10 o del Tamiz 40 son reemplazados por Terlenka, independientemente del porcentaje de reemplazo que se haya implementado en la fabricación de la mezcla.

En contraste, las mezclas con reemplazo de agregados en la fracción del tamiz 80 mostraron ligeras mejorías cuando el porcentaje de reemplazo estuvo entre 4% y 5%. Para el reemplazo del 6%, el comportamiento fue prácticamente similar al de la mezcla convencional, es decir, no presentó mejora alguna.

Los anteriores hallazgos son muy valiosos para la investigación en razón a que limitan el rango de aplicación de la Terlenka a unos pocos casos (dos para ser exactos).

2. Los resultados de los Ensayos de Estabilidad y Flujo también permitieron establecer un orden de magnitud del grado de mejora que se puede esperar en las mezclas con Terlenka en proporciones de reemplazo del 4.0% y 5.0% para la fracción de agregados del tamiz 80. En general, los comportamientos

se consideran favorables dado que la mezcla ofrece una mayor capacidad de carga con menos deformaciones.

La capacidad de carga para las mezclas modificadas que se indicaron es entre el 12% y el 14% mayor que la capacidad obtenida para la mezcla convencional; de forma similar, el comportamiento favorable también se evidencia en los niveles de deformación, en términos de flujo, ya que las mezclas modificadas tiene valores de flujo entre el 15% y el 17% menores a los obtenidos en la mezcla convencional. Esto se traduce en una mejora de la relación Estabilidad / Flujo de entre el 34% y el 35% para las mezclas modificadas, con respecto a la mezcla patrón.

3. Sobre las mezclas con reemplazo de 4.0% y 5.0% en la fracción del tamiz 80, se ejecutaron ensayos de tensión indirecta que arrojaron como resultado un comportamiento ligeramente desfavorable en comparación con la mezcla convencional.

Esto dado que los valores de resistencia a la tensión promedio de las mezclas modificadas son en todos los casos menores a los valores promedio de la resistencia a la tensión de la mezcla convencional. Sin embargo, se debe señalar que la gran mayoría de los resultados de las mezclas modificadas se encuentra dentro de los límites establecidos por los valores mínimos y máximos de resistencia a la tensión hallados para la mezcla asfáltica convencional.

Adicionalmente, la susceptibilidad al agua evaluada a partir de los valores de la Relación de Resistencia a Tensión se puede considerar similar para las mezclas analizadas, ya que para la mezcla convencional el valor es del 80.0% y para las mezclas modificadas los valores son de 77.4% (reemplazo del 4.0%) y de 79.7% (reemplazo del 5.0%).

Lo anterior significa que el comportamiento de las mezclas modificadas es muy similar al de la mezcla convencional, aunque ligeramente menor, tanto en términos de resistencia a la tensión como de susceptibilidad al agua.

4. El ensayo de Inmersión – Compresión, que también permite evaluar el efecto del agua sobre las mezclas asfálticas se realizó únicamente sobre la mezcla con un porcentaje de reemplazo de 4.0% para la franja de agregados en el

tamiz 80, dado que fue la mezcla que mejores resultados de Estabilidad y Flujo presentó.

Los resultados del ensayo indicaron un comportamiento notoriamente desfavorable de la mezcla modificada contra la convencional, en términos de resistencia a la compresión simple para la condición seca, teniendo en cuenta diferencias del 9% en los valores promedio de dicha resistencia. Para la condición húmeda, los valores de resistencia de la mezcla modificada y de la mezcla convencional son similares.

Sin embargo, evaluando el valor de la Resistencia Conservada, la mezcla modificada presenta un mejor comportamiento con base en un valor de Resistencia Conservada del 85% en comparación con el 80% obtenido para la mezcla convencional.

Lo anterior se traduce en que la mezcla modificada ofrece resistencias menores con respecto a la convencional, pero mejor comportamiento ante la acción del agua.

Con base en los resultados expuestos, se puede establecer que el reemplazo de una fracción de agregados por Terlenka, en forma de grano, solo es positivo cuando el tamaño de los agregados está alrededor del Tamiz 80 y el porcentaje de reemplazo es del 4.0% al 5.0%. Para tamaños mayores, no se esperan resultados positivos, independientemente de la proporción de reemplazo.

El comportamiento observado puede ser causado porque cuando se retiran agregados de tamaños del tamiz 10 y del tamiz 40, se retiran partículas relativamente grandes que hacen un aporte de resistencia mayor que el que puede ser ofrecido por la Terlenka, aún después de la rigidización que sufre por los efectos de la temperatura durante el proceso de fabricación de la mezcla. En contraste, cuando se retiran agregados con tamaños de partícula menores, la resistencia que aporta la Terlenka puede tener el mismo orden de magnitud que la resistencia que aportan dichas partículas de agregado.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2008). *Propuesta técnica para garantizar la homogeneidad de los asfaltos producidos en las refinerías Colombianas*. Bogotá.
- Huaxin Chen, Q. X. (2009). Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. *Materials and Design*, 30 , 2595–2603.
- INVIAS . (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá.
- INVIAS. (2013). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá.
- INVIAS. (2015). *Plan Estratégico Institucional 2015 – 2018*. Bogotá.
- J. E. Orjuela, E. P. (2014). *Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos*. Bogotá : Universidad Católica de Colombia.
- J. S. Chen, K. Y. (2005). Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers., nº 40 ():. *Journal of materials science*, 40, 87-95.
- Kalia Anurag, F. X. (2009). Laboratory investigation of indirect tensile strength using roofing polyester waste fibers in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 23 , 2035–2040.
- M.Q. Ismael, H. M.-T. (2015). Reinforcement of Asphalt Concrete by Polyester Fibers to Improve Flexural Bending Fatigue Resistance. *Journal of Engineering* 21, nº 1, 115-130.
- MANUALIDADES Y BELLAS ARTES ON LINE SL. (2013-2017). Obtenido de <http://www.manualidadesybellasartes.es/8148/es/Productos/155terlenka5m/cordon-colombiano-terlenka-18-mm-5-metros.aspx>
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). *Informe de Gestión 2015*. Bogotá: Oficina Asesora de Planeación.
- Q. Ye, S. Y. (2009). Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures. *International Journal of Fatigue* 31, 1598-1602.
- Qinwu Xu, H. C. (2010). Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects. *Construction and Building Materials*, 24 , 2003–2010.
- Rondon, H. A. (2008). Estado del conocimiento sobre el estudio de mezclas asfálticas modificadas en Colombia. . *Infraestructura Vial*, 10-20.

- Rondon, H. A. (2008). Estado del conocimiento sobre el estudio de mezclas asfálticas modificadas en Colombia. . *Infraestructura Vial*, 10-20.
- Sayyed Mahdi Abtahi, M. S. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24 , 871–877.
- Shaopeng Wu, Q. Y. (2008). Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction and Building Materials*, 22, 2111–2115.
- Todo Sobre Fibras Textiles. Coats plc. Reino Unido.* (s.f.). Obtenido de <http://www.coatsindustrial.com/es/information-hub/apparel-expertise/know-about-textile-fibres>
- Universidad de Sonora, México. (11 de 2016). *Generalidades y definiciones sobre los pavimentos.* Obtenido de [http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/capitulo 2.pdf](http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/capitulo%202.pdf)
- Universidad del Azuay . (2014). *Especificaciones técnicas de las bases textiles que se ofertan en el medio Manual informativo dirigido a estudiantes, diseñadores y vendedores del ramo.* Ecuador.
- W. Shao-peng, L. G. (2006). Effect of fiber types on relevant properties of porous asphalt. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, nº 16, 791-795.
- Z. Basto, J. A. (2016). *Comparación del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica tipo mdc-19 adicionada con fibras de terlenka y una mezcla asfáltica convencional. Variable: adición tipo grano*”. Bogota: Fuerzas Militares de Colombia, Ejército Nacional, Escuela de Ingenieros Militares, Departamento de Investigaciones.